DIE NATURWISSENSCHAFTEN

28. Jahrgang | 26. April 1940 | Heft 17

Versuch einer Theorie der Dynamik der Mangan- und Eisenschichtung im eutrophen See[1].

Von WILHELM EINSELE, Weissenbach a. Attersee.

Vorbemerkung. Die *Limnologie*, die die „allesumspannende" Erforschung der Binnengewässer zu ihrem Gegenstande hat, ist auch heute noch außerhalb ihrer Fachkreise wenig eingehend bekannt. Von der zunächst vorwiegend extensiven, dann aber mehr und mehr systematischen Sammlung von biologischen, physikalischen, geologischen und chemischen Beobachtungen ist sie in den letzten Jahren in steigendem Maße auch zum Experiment (im Laboratorium und im Großversuch an natürlichen Gewässern) übergegangen und hat auf der so geschaffenen Grundlage mit der Bildung breit angelegter Theorien begonnen. Manche ihrer theoretischen Lehren, die wegen der höchst komplexen Natur ihrer Probleme allerdings bisweilen noch schematisierende und programmatische Züge aufweisen, erheben so umfassende Ansprüche, daß man wohl annehmen darf, daß in naher Zukunft zahlreiche Zweige der Naturwissenschaft sich mit ihr eingehender werden auseinandersetzen müssen. Man darf auch hoffen, daß von dieser Auseinandersetzung neue Anregungen ausgehen werden, vor allem in bezug auf Fragen, die im Laboratorium nur teilweise gelöst werden können.

Als solche — die Limnologie bearbeitet daneben auch praktisch wichtige Aufgaben (Fischereiwirtschaft, technische Wasserwirtschaft) — seien einige besonders wesentlich erscheinende kurz genannt: die Gesetze, die Lebensräume und Lebensgemeinschaften umspannen; genetische Fragen [Milieu und Selektion, Modifikation, Artbildung[2]]; geologische Fragen (Bildung von Sedimenten „in statu nascendi"), und schließlich *Probleme, die sich aus dem wechselseitigen Bestimmtsein physikalisch-chemischer, geochemischer und biologischer Prozesse ergeben.*

Im folgenden sollen nun einige Beobachtungen und Versuche, welche der zuletzt genannten Fragengruppe zugehören und welche das Verhalten von Eisen und Mangan in einer bestimmten Kategorie von Seen [den eutrophen)[3]] betreffen, dargestellt und theoretisch ausgewertet werden. Von da aus sollen schließlich noch einige kurze Ausblicke auf verschiedene, nicht unmittelbar zum engeren Thema gehörige Fragen gegeben werden Die gesamte Darstellung möge gleichzeitig als ein Beispiel limnologischer Arbeitsweise gelten.

I.

Daß in bestimmten natürlichen Wässern (Quellen, Grundwasser) nicht selten beträchtliche Mengen *Eisen* und *Mangan* in echt gelöster Form (als Bikarbonate) enthalten sind, ist seit langem bekannt. Das Studium ihres Vorkommens in *Binnenseen*, insbesondere das des Mangans, ist viel jüngeren Datums. Zum ersten Male wurde das Mangan und seine Schichtung unter limnologischen Gesichtspunkten in tropischen Seen (auf Java und Sumatra) während der deutschen limnologischen Sundaexpedition in den Jahren 1928—1929 von RUTTNER untersucht (RUTTNER 1931). Seitdem liegen Ergebnisse gleichartiger Untersuchungen aus einer größeren Reihe vornehmlich deutscher, schwedischer, nordamerikanischer und japanischer Seen vor, und sie haben gezeigt, daß es kaum einen eutroph geschichteten, d. h. in den Tiefenschichten sauerstoffarmen See gibt, der in seiner O_2-armen Zone nicht mehr oder weniger große Mengen der beiden Metalle gelöst enthielte. Ihre Konzentrationen steigen nicht selten über 1000 mg/cbm, vereinzelt über 10000 mg/cbm an.

II.

In bezug auf die Abstufungen der Fe^{++}- und Mn^{++}-Konzentrationen in vertikaler Richtung (Schichtung) ergaben die Untersuchungen RUTTNERS (besonders in den eutrophen Seen Javas) höchst auffällige Sachverhalte. Die Mn-Konzentration wies nämlich in der Regel hart an der oberen Grenze der sauerstoffarmen Zone ein scharf ausgeprägtes Maximum auf, dem ein mehr oder weniger steiler Abfall folgte. Die Schichtung des Eisens ging in keinem Falle auch nur annähernd parallel. Die extremsten Verhältnisse fand RUTTNER im Ranu Klindungan: die von ihm am 28. VII. 1929 festgestellten vertikalen Verteilungsverhältnisse sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Wie aus der Tabelle zu ersehen ist, stieg die Mn-Konzentration bereits 2 m unterhalb der Schicht, in der das Mangan zum ersten Male nachzuweisen gewesen war, auf ihren maximalen Wert an, während das Eisen in derselben Zone nur in Spuren vertreten war. Nach der Tiefe zu nahm dann (von kleinen Unregelmäßigkeiten abgesehen) die Fe-Konzentration immer höhere Werte an, die Mn-Konzentration dagegen fiel kontinuierlich ab.

[1] Aus dem Institut für Seenforschung der Kaiser Wilhelm-Gesellschaft Langenargen a. Bodensee.

[2] Anmerkung bei der Korrektur: Hierzu sei auf eine nach der Drucklegung des Aufsatzes erschienene Arbeit von BALDI u. PIROCCHI: „Genetische Ausblicke in der Limnologie" verwiesen. [Arch. f. Hydrobiol. 36 (1939)].

[3] „eutroph" bedeutet etwa: nährstoffreich. Gegensatz: „oligotroph" bzw. „dystroph".

Tabelle 1.

Tiefe	mg/cbm		Relative Konzentration (über Grund = 100)	
m	Fe	Mn	Fe	Mn
5	30	0	2	0
7	30	2300	2	104
9	30	15000	2	680
12	—	15000	—	680
20	1500	7000	83	318
30	1350	5000	75	227
50	1580	3700	88	168
70	1800	3500	100	160
100	1950	3500	107	160
125	1800	2200	100	100

Schichtung des Mangans und des Eisens im Ranu Klindungan (Java) am 28. VII. 1929 (RUTTNER **1931**, 264). Um die Unterschiede in den Schichtungen der beiden Metalle deutlicher hervortreten zu lassen, sind hinter den absoluten noch die relativen Konzentrationen (Konz. über Grund = 100) angegeben. (Ebenso in den folgenden Tabellen.) (Vgl. auch das unten unter III, 1. und 2. Gesagte.)

Während das Mangan nun in den untersuchten tropischen Seen fast immer „invers" geschichtet ist, ist in den Seen der gemäßigten Breiten diese Schichtungsform verhältnismäßig selten. Wie im folgenden dargetan werden soll, zeigt aber trotzdem der nähere Vergleich der Eisen- und Manganschichtung in den Seen *beider* Gebiete weitgehend analoge Züge: *die Schichtungsverhältnisse in den tropischen Seen können aufgefaßt werden als Spezialfall allgemeiner Gesetzmäßigkeiten, die über die individuellen Unterschiede der verschiedenen Seen (bezüglich Lage, Tiefe usw.) hinweg die Verteilungsdynamik beider Stoffe beherrschen.*

III.

Als Demonstrationsbeispiel für die eutrophen Seen der gemäßigten Breiten möge ein nahe bei Langenargen gelegener eutropher See, der *Schleinsee*, benutzt werden. Seit 1935 wurde in die dort durchgeführten ausgedehnten chemischen Untersuchungen auch die Mangan- und Eisenschichtung einbezogen. Das intensive Studium des Kreislaufs der beiden Stoffe wurde von mir im Frühjahr 1937 aufgenommen; bestimmte Fragestellungen hatten sich zu dieser Zeit aus den vorausgegangenen Beobachtungen und aus einer Reihe experimenteller Untersuchungen ergeben, auf die weiter unten zurückgekommen werden wird.

Vergleicht man in den sauerstoffarmen Tiefenschichten des Schleinsees zu irgendeinem Zeitpunkte während der Stagnationsperioden die Schichtung des Mangans mit der des Eisens, so findet man folgende Sachverhalte:

1. In der in vertikaler Richtung am weitesten vom Sediment entfernten Schicht, in der Eisen und Mangan noch in beträchtlicher Konzentration vorkommen, ist die Mangankonzentration stets absolut höher als die Eisenkonzentration, ganz unabhängig davon, wie sich die Verhältnisse in den sedimentnahen Schichten gestalten. Auch zeigt das Mangan eine ausgesprochene Tendenz, in (vom Sediment aus gesehen) höher gelegene Schichten vorzudringen als das Eisen (s. Tabelle 2).

2. Die Unterschiede der Mangankonzentrationen benachbarter Tiefenstufen sind fast ausnahmslos geringer als die des Eisens. (Vgl. vor allem die Konzentration in 9—11 m, Tabelle 2.) — Die in Tabelle 2 aufgeführten drei Profile wurden aus über vierzig Vertikalserien beliebig herausgegriffen (abgesehen davon, daß bei der Auswahl verschiedene Jahreszeiten berücksichtigt wurden.)

Tabelle 2.

Tiefe	26. Febr. (unter Eis)				26. Mai				16. August			
	mg/cbm		rel. Konz.		mg/cbm		rel. Konz.		mg/cbm		rel. Konz.	
m	Mn	Fe	Mn	Fe	Mn	Fe	Mn	Fe	Mn	Fe	Mn	Fe
7	100	0	11	0	0	0	0	0	30	0	4	0
8	100	0	11	0	30	0	12	0	280	30	37	2
9	100	0	11	0	100	40	40	12	750	450	100	24
10	300	60	33	4	150	180	60	55	750	1400	100	74
11	900	1700	100	100	250	330	100	100	750	1900	100	100

Die Eisen- und Mangankonzentrationen in den Tiefenschichten des Schleinsees im Februar, Mai und August (absol. Konz. in mg/cbm und relative Konz. [üb. Grund = 100]).

Seen, in denen prinzipiell ähnliche Schichtungen gefunden wurden, sind u. a. aufgeführt bei JUDAY, BIRGE und MELOCHE (1938), bei RUTTNER (1937) und MÜLLER (1938). Mit Zahlen angeführt sei noch der im Salzkammergut gelegene Hüttensteiner See. Dieser See wurde bereits vor 7 Jahren von RUTTNER untersucht. (Je ein Vertikalprofil am 16. X. 1932 und am 26. VI. 1933.) Als die vorliegende Arbeit schon längere Zeit zum Druck gegangen war, hatte ich Gelegenheit, ihn ebenfalls zu untersuchen, und zwar zufällig fast am gleichen Jahrestag wie RUTTNER. Die von mir festgestellten Werte (s. Tabelle 3) stimmten mit denen RUTTNERS im wesentlichen überein, doch ergaben sich einige interessante Verschiedenheiten, auf die hier leider nicht eingegangen werden kann (vgl. dazu RUTTNER 1937, S. 192—195).

Tabelle 3.

Tiefe	mg/cbm		Relative Konzentration (über Grund = 100)	
m	Fe	Mn	Fe	Mn
10	0	120	0	2
11	0	500	0	8
12	100	740	0,5	12
15	350	2000	2	33
20	1900	2500	10	42
25	3000	3600	15	60
30	4000	4000	21	67
40	17000	5700	87	95
43	19500	6000	100	100

Profil aus dem Hüttensteiner See. 17. X. 1939.

Bevor nun die Betrachtung der Naturbefunde fortgesetzt wird, mögen zunächst einige chemische Unterschiede im Verhalten von Verbindungen des Eisens und des Mangans betrachtet werden, die

für die Erklärung ihrer Schichtungsunterschiede und ihrer limnochemischen Dynamik wesentlich erscheinen.

IV.

Generell betrachtet ähneln Mangan und Eisen einander in ihrem chemischen Verhalten bekanntlich weitgehend, doch weist der Ablauf analoger Reaktionen fast immer mehr oder weniger bedeutende graduelle Verschiedenheiten auf. Besonders wichtig erscheinen im vorliegenden Zusammenhange die Unterschiede bei der Reduktion ihrer dreiwertigen Oxyde bzw. Hydroxyde und bei dem umgekehrten Vorgange, der Überführung der verhältnismäßig leicht löslichen Bikarbonate (mit zweiwertigem Metallion) in die unlöslichen Oxyde mit dreiwertigem Metall[1]): In eutrophen Seen spielen sich die genannten Oxydationsvorgänge (verbunden mit Sedimentierung der Oxydationsprodukte) hauptsächlich während der Herbst- und Frühjahrszirkulation ab, die Reduktionsvorgänge (verbunden mit erneuter Lösung) treten hingegen während der Stagnationsperioden, nach Aufzehrung des Sauerstoffs in den Tiefenschichten, auf.

a) *Reduktion der Oxyde.*

Ganz allgemein kann gesagt werden, daß unter sonst gleichen Bedingungen Manganihydroxyd (auch $Mn\,O_2$) leichter reduzierbar ist als Ferrihydroxyd. Von besonderem Interesse für uns ist das Verhalten von Aufschwemmungen beider Stoffe gegenüber dem in den O_2-armen Seezonen häufig vorkommenden Schwefelwasserstoff. Wie aus der analytischen Chemie bekannt ist, werden Manganiverbindungen (oder noch höher oxydiertes Mangan) in saurer *und* in alkalischer Lösung von H_2S [bzw. $(NH_4)_2S$] zur zweiwertigen Stufe reduziert, Ferriverbindungen dagegen nur in saurer Lösung. Da nun die Reaktion des Tiefenwassers eutropher Seen vielfach in der Nähe des Neutralpunktes liegt, so war eine genauere Analyse der p_H-Grenze der Reduktion von $Fe(OH)_3$ von Interesse. Sie ergab, daß oberhalb von p_H etwa 6,7 eine Reduktion von Ferrihydroxyd durch H_2S nicht mehr eintritt, während Braunsteinaufschwemmungen bei diesem p_H noch sehr leicht reduziert werden. *Man darf daraus schließen, daß H_2S nur in Seen mit relativ niedrigem p_H als Reduktionsmittel für $Fe(OH)_3$ in Frage kommt.* Abgesehen aber davon spielt H_2S als Reduktionsmittel der Fe-, Mn-Oxyde in Seen wahrscheinlich ganz allgemein eine untergeordnete Rolle. Im Versuch kann man nämlich leicht zeigen, daß faulende organische Stoffe ein ungleich wirksameres Reduktionsmittel darstellen als Schwefelwasserstoff. Am auffallendsten äußert sich dies darin, daß $Fe(OH)_3$ noch bei p_H's reduziert wird ($> 7{,}5$), bei denen H_2S längst versagt.

Daß die Reduktion bei niedrigem p_H wesentlich besser vonstatten geht, läßt sich erwartungsgemäß auch bei Anwendung faulender organischer Substanz als Reduktionsmittel sehr deutlich demonstrieren. Allerdings kann man die Untersuchung der p_H-Abhängigkeit in diesem Falle nur innerhalb eines begrenzten Bereiches durchführen, da in zu saurem Medium die Tätigkeit der Fäulnisbakterien schließlich gehemmt wird. So bleiben z. B. in Parallelversuchen (wenigstens während der ersten Tage) die gebildeten Fe^{++}-Mengen von Proben mit einem p_H zwischen 5 und 5,5 ganz erheblich hinter denen mit einem p_H zwischen 6 und 6,5 zurück. — Ebenso bleiben die Mengen in Proben, deren p_H höher als etwa 6,8 liegt, mit steigendem p_H immer weiter hinter denen mit p_H zwischen 6 und 6,5 zurück. Die Ursachen für die, bezogen auf einen optimalen Bereich, geringer werdenden Reduktionsleistungen sowohl nach der sauren wie nach der alkalischen Seite hin sind oben schon kurz angedeutet: das allmähliche Schwächerwerden der Reduktionswirkung bei p_H's unterhalb 5 beruht auf der zunehmenden *Hemmung der Fäulnis* (bei an sich gesteigerter „Bereitschaft" des Ferrihydroxyds zur Reduktion), das Schwächerwerden oberhalb p_H 6,8 auf den mit steigendem p_H sich mehr und mehr steigernden *Widerständen des Eisenhydroxyds* gegen die Reduktion.

Es ist erstaunlich, welche großen Mengen Mn- bzw. $Fe(OH)_3$ mit relativ geringen Mengen faulender Planktonsubstanz reduziert werden können. So genügt z. B. eine 8 mg/l Zooplankton-Trockensubstanz entsprechende Menge, um bei p_H 6,3 innerhalb von 40 Tagen aus einer $Fe(OH)_3$-Aufschwemmung 24 mg/l Fe zu reduzieren, d. h. in Lösung überzuführen. Mit der etwa 10fachen Planktonmenge werden unter denselben Bedingungen innerhalb von etwa 2 Wochen Fe^{++}-Konzentrationen von 100 mg/l erreicht! — Für die limnologische Auswertung solcher Versuche nicht unwesentlich ist die Tatsache, daß bei Zugabe geringer Mengen Planktonsubstanz (unter 5 mg/l Trockensubstanz) die Reduktion von $Fe(OH)_3$ (nicht aber von MnO_2) oberhalb $p_H \sim 7{,}2$ ausbleibt, während, wie bereits oben gesagt, bei Anwendung größerer Mengen (etwa der 10fachen) Reduktion noch bis zu etwa p_H 8 eintritt.

Wie aus dem folgenden Versuch hervorgeht, findet die Reduktion nur in Verbindung mit dem (dauernd anaerob verlaufenden) Prozeß der Fäulnis selber statt. Läßt man nämlich Planktonsubstanz einige Zeit faulen und fügt dann erst $Fe(OH)_3$ zu, so gelingt, selbst nachdem man einige Stunden gewartet hat, der Nachweis von Ferroeisen nicht. Man muß aus solchen Versuchen schließen, daß unbeständige, sich nicht akkumulierende Zwischenprodukte, die während der Fäulnis entstehen, die Reduktion bewirken.

Wie schon oben kurz gesagt wurde, sind Manganioxyde viel leichter reduzierbar als Ferrioxyd. Stellt man Parallelversuche mit Ferrihydroxyd bzw. Braunsteinpulver an, so ergibt sich, daß (vor allem während der ersten Tage nach Ansetzen einer Serie) bei allen einander entsprechenden Proben die Mn^{++}-Werte die Fe^{++}-Werte bei weitem übertreffen. Braunstein wird (im Gegen-

[1]) Daß ein dem Ferrihydroxyd völlig analog gebautes Manganihydroxyd besteht, ist bekanntlich unwahrscheinlich. Man faßt vielmehr die ersten Oxydationsprodukte des Mn^{++} (Mn_2O_3 bzw. Mn_3O_4) als Manganosalze einer Mangansäure der Konstitution H_2MnO_3 bzw. H_4MnO_4 auf. — In dieser Arbeit werden der Einfachheit halber die ersten Oxydationsprodukte des Mn^{++} stets als Manganioxyd bezeichnet. Handelt es sich, wie bei einigen weiter unten beschriebenen Versuchen, um Braunstein (MnO_2), so ist dies ausdrücklich angegeben.

satz zu $Fe(OH)_3$) auch bei p_H's > 8 und bei Anwendung geringer Mengen organischer Substanz noch kräftig und rasch reduziert.

Das unterschiedliche Verhalten der beiden unlöslichen Oxyde[1]) gegenüber faulenden organischen Substanzen wird besonders deutlich in Versuchen, bei denen sich die beiden Oxyde nebeneinander in derselben Versuchsflasche befinden. Es geht dann, auch bei für die Reduktion des Eisens optimalen p_H's, zunächst fast ausschließlich Mangan in Lösung, und solange noch unreduziertes Manganioxyd vorhanden ist, bleiben die Fe^{++}-Konzentrationen dauernd gering[2]).

Schließlich muß noch auf den vielleicht überzeugendsten (und für die Erklärung der Unterschiede der limnochemischen Dynamik sehr wesentlichen) Beweis für die im Vergleich zum $Fe(OH)_3$ leichtere Reduzierbarkeit und damit auch Mobilisierbarkeit der Manganoxyde eingegangen werden.

Manganioxyd wirkt Ferroverbindungen gegenüber als Oxydationsmittel. Fügt man also Braunsteinpulver zu ferrobikarbonathaltigem natürlichem Wasser, so geht Braunstein (nach Reduktion) in Lösung, und Ferrobikarbonat fällt (infolge von Oxydation) als Ferrihydroxyd aus.

Von den zahlreichen Versuchen, die zu dieser Frage gemacht wurden, möge einer angeführt werden, in dem angestrebt war, so weit wie möglich natürliche Bedingungen einzuhalten.

Die Analyse einer Tiefenwasserprobe aus dem Schleinsee hatte das in Tabelle 4 niedergelegte Ergebnis gehabt. Einer weiteren Probe dieses Wassers[3]) wurde nun 1 ccm einer Aufschwemmung zugefügt, die soviel Manganihydroxyd[4]) enthielt, daß bei völliger Lösung eine Mn^{++}-Konzentration von 1900 mg/cbm hätte entstehen müssen. Wie aus Tabelle 4 hervorgeht, wurde die Konzentration auch tatsächlich beinahe genau in dieser Höhe gefunden. Die ursprünglich vorhanden gewesene Fe^{++}-Konzentration fiel hingegen von 2100 mg/cbm auf 400 mg/cbm zurück[5]).

Tabelle 4.

	Fe^{++}	Mn^{++}
Unverändertes natürliches Tiefenwasser.	2100	900
Nach Zugabe von 1000 mg/cbm Mn als Manganihydroxyd. .	400	1850

b) Oxydation der Bikarbonate.

Im natürlichen Wasser sind Mangano- und Ferrobikarbonat dauernd nur beständig, wenn es sauerstoffarm ist, wie das z. B. in den Tiefenschichten eutropher Seen während der Stagnationsperioden der Fall ist. Gegen im Wasser gelösten Sauerstoff ist insbesondere Ferrobikarbonat außerordentlich empfindlich. Bei bestimmten, in eutrophen Seen häufigen p_H-Bedingungen ($p_H \sim 7$ oder höher) wird es innerhalb von wenigen Minuten nach Durchlüftung einer Probe quantitativ oxydiert.

Mit fallendem p_H nimmt die Empfindlichkeit von Ferrobicarbonat gegen im Wasser gelösten Sauerstoff rasch ab. Bis herunter zu p_H 6,7 geht zwar die quantitative Oxydation des Eisens in einer durchlüfteten Probe mit einem Fe-Gehalt von einigen mg/l noch innerhalb einer Stunde vor sich, bei p_H's unter 6 dauert dieser Vorgang jedoch bereits mehr als einen Tag, bei p_H's zwischen 5 und 5,5 ist auch mehrere Tage nach Durchlüftung noch ein Rest nicht oxydierten Eisens vorhanden[1, 2]).

Mit manganobikarbonathaltigem Wasser sind entsprechende Versuche schwer durchzuführen. Schon in etwa neutralem Wasser geht die Oxydation nur schleppend vor sich — sie dauert 2 oder mehr Tage —, unterhalb p_H 6 bleiben durchlüftete Proben natürlichen manganobikarbonathaltigen Wassers wochenlang unverändert.

Bekanntlich gibt es Bedingungen, unter welchen auch Mn^{++} durch freien Sauerstoff *rasch* oxydiert und gefällt wird (ammoniakalisches oder NaOH-haltiges Wasser). Wie einige Versuche zur Festlegung der hier in Frage kommenden p_H-Grenzen ergaben, erfolgt die Oxydation von Mn^{++} innerhalb einer Stunde bei $p_H \sim 9{,}0$, innerhalb einer Minute bei p_H's oberhalb $\sim 9{,}8$.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß bei allen einander entsprechenden Versuchen Eisenbikarbonat jeweils längst oxydiert war, ehe sich der Beginn einer Oxydation des Manganobikarbonats überhaupt nachweisen ließ. *Der weiter oben besprochenen, im Verhältnis zum Eisen leichteren Reduzierbarkeit des drei- bzw. vierwertigen Mangans entspricht eine schwerere Oxydierbarkeit seiner zweiwertigen Stufe.*

[1]) Es empfiehlt sich, zu solchen Versuchen nicht gefälltes Mn_2O_3aq zu verwenden, sondern Braunsteinpulver. Vor allem in stärker CO_2-haltigem Wasser löst sich nämlich bei Verwendung von M_2O_3aq ein gewisser Teil Mn auch ohne Mitwirkung von Reduktionsmitteln. Dies hängt wahrscheinlich damit zusammen, daß das Mn_2O_3aq ein aus zwei- und vierwertigem Metall gemischtes Oxyd darstellt.

[2]) Gewisse Unregelmäßigkeiten, die bei solchen Versuchen auftreten, scheinen darauf hinzudeuten, daß Mn^{++}-Ionen in höheren Konzentrationen hemmend auf die Fäulnis einwirken.

[3]) Das Wasser zu solchen Versuchen wurde natürlich nach der für O_2-Bestimmungen vorgeschriebenen Methode entnommen.

[4]) Das Manganioxyd stammte aus natürlichem Tiefenwasser, das Manganobikarbonat enthalten hatte und durchlüftet worden war.

[5]) OHLE hat in anderem Zusammenhange und bei Vorliegen wesentlich anderer Reaktionsbedingungen (Prüfung der WINKLERschen O_2-Bestimmungsmethode) schon früher auf die Tatsache hingewiesen, daß Ferroionen Manganihydroxyd reduzieren können. In der analytischen Chemie wird diese Reaktion zur quantitativen Bestimmung von MnO_2 benutzt.

[1]) Diese und die folgenden sich auf die Oxydation von Mn^{++} oder Fe^{++} beziehenden Angaben gelten für kalkhaltiges Wasser bei Zimmertemperatur.

[2]) Vor allem im Zusammenhang mit Problemen der technischen Wasserversorgung ist es vor langer Zeit bekannt geworden, daß Manganobicarbonat erheblich schwerer oxydierbar ist als Ferrobicarbonat oder — praktisch gesprochen — daß die Entfernung von Mangan aus Quell- oder Grundwässern viel schwieriger ist als die von Eisen (vgl. TILLMANNS 1914).

Bei den eben besprochenen Versuchen wurden die Proben so lange durchlüftet, bis sie etwa O_2-gesättigt waren. Zu der im vorliegenden Zusammenhange sehr wichtigen Frage der Abhängigkeit der Oxydation von *abgestuften* O_2-Konzentrationen des Mediums können experimentell begründete Angaben leider nicht gemacht werden, doch kann aus den mehreren Hunderten von Analysen von Proben aus verschiedenen Seen, bei denen die nebeneinander existierenden O_2-, Fe^{++}- und Mn^{++}-Konzentrationen bestimmt wurden, geschlossen werden, daß bei p_H's in der Nähe des Neutralpunktes Fe^{++} nur dauernd beständig ist, wenn die O_2-Konzentration nicht mehr als etwa 0,5, Mn^{++}, wenn sie nicht mehr als 1 mg/l beträgt. Daß (unter sonst gleichen Bedingungen) Mn^{++} mehr O_2 „verträgt" als Fe^{++}, war bei seiner ganz allgemein zu konstatierenden größeren Unempfindlichkeit gegenüber Oxydationsmitteln zu erwarten. Für das Zustandekommen der Charakteristika der Mangan-Eisenschichtung spielt dieser Umstand wahrscheinlich eine noch wichtigere Rolle als die viel geringere Geschwindigkeit, mit der die Oxydation des Mangans im Vergleich zu der des Eisens verläuft.

Die in den gesamten, das allgemeine Verhalten bestimmter Eisen- und Manganverbindungen betreffenden Ausführungen dieses Abschnitts enthaltenen Prinzipien sollen im folgenden Abschnitt vorausgesetzt und als Leitgedanken zur Deutung der Dynamik der Eisen- und Manganschichtungen dienen.

V.

Da Eisen- und Manganbikarbonat im Wasser eutropher Seen nur dann beständig sind, wenn es fast sauerstoffrei ist, so treten die beiden Metalle im Ablauf einer Stagnationsperiode, der eine Vollzirkulation vorausgegangen war, erst dann auf, wenn in den bodennahen Wasserschichten der Sauerstoff aufgezehrt ist. Je nach der Tiefe eines Sees und den vorhandenen, die O_2-Zehrung bewirkenden Mengen organischer Stoffe kann dieser Zustand schon wenige Wochen, unter Umständen aber auch erst mehrere Monate nach dem Beginn einer Stagnationsperiode erreicht werden. — Ist er jedoch einmal erreicht, so erscheinen auch bald Eisen und Mangan im Tiefenwasser, da es dieselben Vorgänge (Fäulnis) sind, die sowohl die Aufzehrung des im Wasser gelösten Sauerstoffs als auch die Lösung der Hydroxyde des Eisens und des Mangans verursachen. Da den Fe- und Mn-Hydroxyden bei der Lösung Sauerstoff entzogen wird, kann auch dieser Vorgang als O_2-Zehrung (Zehrung gebundenen Sauerstoffs) aufgefaßt werden. Die in der Kontaktzone in Lösung gegangenen Metalle werden schließlich durch *Strömungen*, die auch während der Stagnationszeit eines Sees eine gewisse Vermischung des Wassers der einzelnen Zonen zur Folge haben, in den unteren Wasserschichten verteilt (vgl. dazu EINSELE u. VETTER S. 292). Wie wir im folgenden sehen werden, kommt den Strömungen, also *physikalisch-hydrodynamischen* Vorgängen, für die Erklärung der Mangan-Eisenschichtung eine ebenso große Bedeutung zu wie den in Abschnitt IV besprochenen *biologischen* und *chemischen* Vorgängen.

An einem angenommenen Beispiel — es entspricht etwa dem im Schleinsee vielfach beobachteten Ablauf — soll versucht werden, das Zusammenwirken der drei oben genannten Faktoren bei der Erzeugung des typischen Bildes der Eisen-Manganschichtung zu demonstrieren (vergleiche Fig. 1).

Der gedachte See sei 11 m tief und befinde sich seit einer gewissen Zeit im Stagnationszustande. Sein thermisches Hypolimnion beginne bei 7 m, die Zone extremer Sauerstoffarmut (O_2 weniger als 0,5 mg/l) bei 9 m; zwischen 8 und 9 m befinde sich eine Zone *relativer* O_2-Armut (0,7—1,2 mg/l), und darüber sei die O_2-Kontration höher als 2 mg/l. — Im Wasser zwischen 9 und 11 m seien

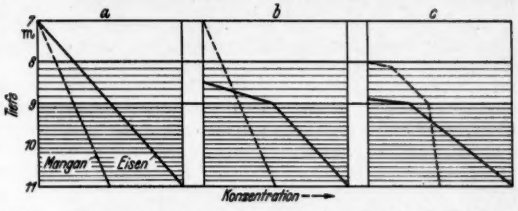

Fig. 1. Schema der Entwicklung der Mangan-Eisenschichtung im Anschluß an eine hypolimnische Austauschströmung. (Enggestreifter Bezirk: O_2-Konz. unter 0,5 mg/l. Weiter gestreifter Bezirk: O_2 = 0,7 bis 1,2 mg/l; nichtgestreifter Bezirk: O_2 *mehr* als 2 mg).

bestimmte Mengen Fe^{++} und Mn^{++} gelöst, und zwar halb soviel Mangan wie Eisen. Durch eine Austauschströmung werde nun eine gewisse Menge des Wassers aus der 9—11 m-Zone bis an die obere Grenze des Hypolimnions (7 m) verfrachtet. Die durch diesen rein physikalischen Vorgang geschaffene Schichtung ist in Fig. 1a schematisch wiedergegeben. Aus den in Abschnitt IV erörterten Gründen (O_2-Konzentration zu hoch!) kann sich das Eisen aber nur ganz vorübergehend in der Zone zwischen 7 und 9 m halten, es wird rasch oxydiert und bewegt sich als Ferrihydroxyd wieder dem Sedimente zu. Da das Mangan träger reagiert, so bleibt seine Schichtung zunächst unverändert. Der so geschaffene Übergangszustand ist in Fig. 1b skizziert.

Schließlich wird in der 7—8-m-Zone auch das Mangan gefällt (in der 8—9-m-Zone reiche die O_2-Konzentration hierzu nicht aus). Im Gegensatz zum Eisen werde jedoch das gefällte (aber leicht wieder reduzierbare) Mangan beim Passieren der 9—11-m-Zone wieder gelöst. (Es ist, abgesehen von der allgemeinen Bereitschaft dieser Zone zur Reduktion, dort zweiwertiges Eisen in relativ großer Menge zugegen, vgl. S. 260). Nach Beendi-

gung der gesamten Vorgänge resultiert so schließlich eine Schichtungsform wie sie durch Fig. 1c vorgestellt wird. *Diese Form entspricht den in Abschnitt III geschilderten, ganz allgemein in eutrophen Seen vorgefundenen Schichtungsbildern.*

Der oben dargelegte, zugleich mechanisch und chemisch bestimmte Prozeß der „Schichtungsdifferenzierung" kann im Laufe einer Stagnationsperiode sich natürlich vielfach wiederholen. Wenn er sich — dies entspräche etwa dem normalen Fall in der Natur — an einer Fig. 1c entsprechenden Schichtung vollzieht, so muß dadurch eine immer stärkere „Aufrichtung" der Manganschichtung eintreten. Tatsächlich findet man z. B. im Schleinsee, daß im Hochsommer (etwa 3 Monate nach dem ersten Auftreten von Mangan) die Konzentrationen der unteren Mangan führenden Schichten (9—11 m) identisch sind (vgl. Tabelle 2: 16. VIII. und Fig. 2). Die Erreichung dieses Zustandes der Mn-Schichtung wird noch dadurch begünstigt, daß die Zufuhr vom Sediment her um diese Zeit offenbar bereits aufhört (vgl. dazu weiter unten).

Eine besonders schöne Bestätigung erfuhr die oben entwickelte Theorie der Dynamik der Eisen-Manganschichtung durch eine Beobachtungsserie am Schleinsee aus der Zeit des Übergangs der Herbstzirkulation in die Vollzirkulation (Herbst 1937). Sie lieferte gleichzeitig einige wichtige Hinweise für die Frage der in tropischen Seen „hart an der oberen Grenze der O_2-freien Zone" auftretenden Manganmaxima (vgl. Abschn. II).

Ende September 1937 hatten die Herbstteilzirkulationen im Schleinsee die 7-m-Grenze überschritten, und epilimnisches O_2-reiches Wasser begann bereits — zunächst nur in geringeren Mengen — bis zur 8-m-Schicht vorzudringen. Da in den folgenden Wochen besonders milde Witterung herrschte, so war die Teilzirkulation bis zum 22. X. nur um 1 m, d. h. bis zur 8-m-Schicht vorgerückt, die 9-m-Schicht hatte (ähnlich wie vorher die 8-m-Schicht) nur geringe Mengen epilimnisches O_2-reiches Wasser zugemischt erhalten[1]). Die dadurch bewirkte relativ geringfügige Erhöhung der O_2-Konzentration genügte jedoch schon zur Oxydation und Ausfällung des Eisens[2]) (vgl. Tabelle 5).

[1]) Das Mischungsverhältnis läßt sich z. B. abschätzen nach den Änderungen der Silikatkonzentration. Diese hatte von Ende September bis 22. X. in 9 m Tiefe von 2400 mg Si/cbm auf 2100 abgenommen. Da das epilimnische Wasser um diese Zeit nur etwa 400 mg Si/l enthielt, so bedeutet die Abnahme eine Einmischung von etwa 10% epilimnischem Wasser.

[2]) Es darf als häufig vorkommend angesehen werden, daß schon, bevor eine Schicht beim Tieferrücken der Teilzirkulationen schließlich in die homotherme Oberzone einbezogen wird, das in ihr gelöst gewesene Eisen und Mangan der Einbeziehung zuvorkommt, d. h. daß es schon vorher ganz oder teilweise ausgefällt und entweder sedimentiert oder (dies gilt vor allem für Mangan) in tieferen Schichten wieder in Lösung überführt wird. Über Ausnahmen von diesem Verhalten vgl. Abschn. VI. Es sei hier noch angeführt, daß neben dem Eisen in Lösung gewesenes Phosphat dasselbe Schicksal erleidet (vgl. EINSELE 1938).

Tabelle 5.

Tiefe	Mangan mg/cbm					
	September		Oktober		November	
m	14.	28.	22.	27.	6.	17.
8	400	300	∞30	∞30	∞30	80
	(200)	(∞30)	(∞20)	(∞50)	(∞20)	—
9	800	800	600	550	∞30	80
	(900)	(350)	(180)	(240)	(∞20)	—
9,5	800	800	1500	1000	∞50	—
10	800	950	1200	1400	1400	—
11	800	950	1200	1400	1650	80
	Sauerstoff mg/l					
8	0,5	2,9	7,5	8,8	8,8	7,8
9	0,3	1,2	2,4	—	—	—
9,5	—	—	0,55	1,8	8,8	—
10	0,2	0,5	0,5	0,9	0,6	—
11	0,1	0,1	0,2	0,6	0,1	7,8

Die Mangan- (Eisen-) und die Sauerstoffschichtung im Schleinsee während der Herbstteilzirkulationen (14. IX. bis 6. XI.) bis zur Vollzirkulation (17. XI.) im Jahre 1937. Die Eisenkonzentrationen sind nur für die 8- und 9-m-Schicht (in Klammern unter den Manganwerten) angeführt.

Wie aus Tabelle 5 zu entnehmen ist, hatte sich die Fe-Konzentration der 9-m-Schicht von Mitte September bis zum 22. X. um 80%, die Mn-Konzentration nur um 25% vermindert. In der nur $^1/_2$ m tiefer gelegenen Schicht wurde am 22. X. ein relatives und absolutes Manganmaximum festgestellt (vgl. Tabelle 5 und Fig. 2). Die Erklärung seines Auftretens ergibt sich zwanglos aus der Annahme, daß das bisher oberhalb der 9,5-m-Schicht gefällte Mangan während seines Absinkens in dieser bzw. in den darunterliegenden Schichten wieder in Lösung gegangen war. Bis zur folgenden Untersuchung war das Maximum in 9,5 m durch die tiefergreifende Zirkulation bereits abgebaut worden, dagegen waren die Mn-Konzentrationen zwischen 10 und 11 m weiter angestiegen. Kurz vor dem Eintritt der Vollzirkulation wurde schließlich in der Schicht über Grund eine Mn-Konzentration von 1650 mg/cbm erreicht[1]). *Auch dieser Anstieg ist ebenso wie die übrigen Änderungen der Mn-Konzentrationen, die seit Mitte September beobachtet wurden, nicht auf Zufuhr vom Sediment, sondern ausschließlich auf „intrahypolimnische" Um-*

[1]) Ein Teil der von RUTTNER untersuchten tropischen Seen wies O_2-arme Mn^{++} und Fe^{++} führende Zonen von über 50 m Mächtigkeit auf. Eine den oben geschilderten Vorgängen entsprechende Einbeziehung auch nur eines Fünftels der Reduktionszone solcher Seen in das Epilimnion, der eine Fällung des Mangans und eine Wiederauflösung in dem jetzt tiefer gelagerten oberen Metalimnion folgt, könnte schon zur Ausbildung relativ bedeutender Maxima in dieser Zone führen. — Es können natürlich metalimnische Manganmaxima auch entstehen, wenn mit Zuflüssen eingeschwemmtes Material Manganoxyde enthält, da angenommen werden darf, daß diese in Lösung gehen, wenn sie bei der Sedimentierung die reduktionsaktive Zone erreichen.

lagerungen zurückzuführen. Für die Richtigkeit dieser Auffassung sprechen (außer den bereits angeführten Argumenten) noch folgende Umstände:

1. Summiert man die Manganmengen, die sich zwischen Ende September und Ende Oktober an den jeweiligen Untersuchungstagen unter 1 qm fanden, so erhält man (innerhalb der anzunehmenden Fehlergrenzen) einen *konstanten* Wert. (Bei der letzten Untersuchung — am 6. XI. s. Tabelle 5 —, als über Grund der höchste Wert erreicht wurde, war die Mn-Summe bereits gefallen, was sich leicht mit der Annahme erklären läßt, daß die nunmehr ganz flach gewordene „Reduktionszone" nicht mehr hinreichte, um das absinkende Manganioxyd zu lösen, so daß dieses ins Sediment gelangte.)

2. Der zweite Beweis basiert auf Folgerungen aus der Entwicklung der Mn- und Fe-Schichtung während der ganzen Periode der Sommerstagnation. Auf ihren Verlauf soll deshalb zunächst näher eingegangen werden (Fig. 2).

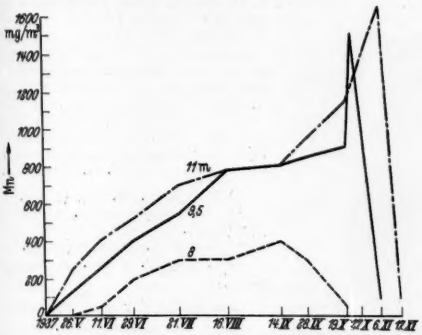

Fig. 2. Gang der Mangankonzentrationen in 8, 9,5 und 11 m Tiefe im Schleinsee während der gesamten Sommerstagnation (bis zum Eintreten der Vollzirkulation).

Wenn man die Bewegungen der Eisen- und der Mangankonzentrationen in der 10—11-m-Zone vom Beginn ihres Auftretens an (d. h. im allgemeinen von Anfang Mai an) verfolgt, so findet man, daß die Mangankonzentrationen zunächst verhältnismäßig viel schneller ansteigen als die Eisenkonzentrationen. Für 1937 ergibt sich unter Berücksichtigung nur derjenigen Periode, während welcher die im Hypolimnion anwesenden Gesamt-Mn-Mengen noch anstiegen, d. h. der Zeit von Anfang Mai bis Mitte September, das in Tabelle 6 niedergelegte Bild (vgl. auch Fig. 2).

Tabelle 6.

	25. V.	29. VI.	21. VII.	16. VIII.	14. IX.
Mangan	25	63	77	86	100%
Eisen	10	47	57	64	100%

Relative Entwicklung der Mn- und Fe-Schichtung in der 10—11 m-Zone. Es wurden jeweils die Mittelwerte aus den für 10 m und 11 m bestimmten Konzentrationen gebildet und diese dann auf die Mittelwerte für den 14. IX. (die = 100 gesetzt wurden) bezogen.

Das zunächst relativ raschere, sich dann aber verlangsamende Ansteigen der Mn-Konzentrationen kann mit denselben Prinzipien, die wir bisher angenommen haben, erklärt werden bzw. muß aus ihnen folgen. Da Mangan leichter reduzierbar ist als Eisen, so wird einerseits im Sediment verfügbares Manganioxyd zunächst in verhältnismäßig größerem Maße herausgelöst als Ferrihydroxyd; dies hat wiederum zur Folge, daß die im Sediment disponiblen Mn-Vorräte früher erschöpft sind als die Fe-Vorräte. ***Es muß also im Verlaufe einer Stagnationsperiode im Hypolimnion eutropher Seen eine allmähliche Verschiebung des Verhältnisses Mn:Fe zugunsten des Eisens eintreten***[1]).

Die im Hypolimnion des Schleinsees z. B. *im Hochsommer* unter 1 qm anwesende Fe-Menge beträgt nach den Untersuchungen mehrerer Jahre rund das $1^1/_2$fache der Mn-Menge. Zur Zeit des Anfanges des Auftretens der beiden Metalle können jedoch die Mn-Mengen größer sein als die Fe-Mengen. Ein stark zugunsten des Mangans verschobenes Verhältnis findet man im Schleinsee am Ende des Frühjahres besonders dann, wenn um diese Zeit die Stabilität der Schichtung noch nicht sehr groß ist, d. h. wenn bei Witterungsumschlägen noch eine Einmischung von O_2-reichem Wasser in die an sich bereits extrem O_2-armen Tiefenschichten erfolgen kann, die zu einer teilweisen Wiederfällung von bereits in Lösung gewesenem Eisen (nicht aber von Mangan) führt. Eine Kombination dieses mehr zufälligen Momentes und der oben angeführten allgemein geltenden erzeugte im Schleinsee das extremste bisher beobachtete Verhältnis von Mangan zu Eisen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7.

Tiefe m	Mn	Fe	Mn:Fe
9	240	160	1:0,67
10	480	220	1:0,45
11	480	280	1:0,58

Mn- und Fe-Schichtung im Schleinsee am 7. V. 1938. Konzentrationen im Milligramm Mn bzw. Fe/cbm.

Unsere letzten Betrachtungen hatten zum Ausgangspunkt die Frage nach der Ursache des starken Ansteigens der Mn-Konzentrationen in den bodennahen Schichten des Schleinsees im Herbst. Der geschilderte Gang der Mn-Konzentrationen im Verlauf einer Stagnationsperiode kann als indirekter Beweis dafür gelten, daß der herbstliche Anstieg nicht auf Zufuhr vom Sediment her zurückzuführen ist, sondern — wie wir weiter oben schon direkt zu beweisen versuchten — auf Umlagerungen der im Hypolimnion vorhandenen Mengen.

Das scheinbar paradoxe Verhalten der Mn-Konzentration während des Ablaufs einer ganzen Sta-

[1]) Siehe dazu die einschränkenden Bemerkungen Abschn. VI.

gnationsperiode geht vielleicht am deutlichsten aus folgender Gegenüberstellung hervor: Wie aus Tabelle 5 zu ersehen ist, stieg die Mn-Konzentration der Schicht über Grund vom 14. IX. bis 6. XI. 1937, also im Verlaufe von 53 Tagen, um 107%. Vom 21. VII. bis 14. IX., also im Verlaufe der unmittelbar vorhergegangenen gleichen Zeit, war die Konzentration über Grund von 700 auf 800 mg/cbm, d. h. nur um 14% gestiegen! Hingegen betrug ihre Zunahme während der dieser zweiten Periode vorhergehenden ersten (26. V. bis 21. VII. = 56 Tage) 180%! (250—700 mg Mn/cbm). — Vgl. hierzu auch Fig. 2: Gang der Mn-Konzentration in 11 m Tiefe. (Schluß folgt.)

Kurze Originalmitteilungen.

Für die kurzen Originalmitteilungen ist ausschließlich der Verfasser verantwortlich.

Stereoskopische Aufnahmen mit dem elektrostatischen Übermikroskop.

VON ARDENNE hat kürzlich in seiner Arbeit: „Ergebnisse einer neuen Elektronen-Übermikroskop-Anlage“[1]) u. a. darauf hingewiesen, daß bei seinem magnetischen Übermikroskop auch eine Einrichtung zur Aufnahme stereoskopischer Teilbilder vorgesehen sei. Diese Bilder werden dadurch gewonnen, daß der gleiche Objektausschnitt unter zwei etwas verschiedenen Neigungen zur Aufnahme gelangt. Durch VON ARDENNE haben wir erfahren, daß einige seiner Stereoaufnahmen unmittelbar vor dem Erscheinen stehen[2]).

Wir haben uns seit etwa einem halben Jahr mit der stereoskopischen Aufnahme von Objekten mit dem elektrostatischen Elektronen-Übermikroskop beschäftigt. Die Neigung des Objektträgerplättchens, das in einem besonders ausgebildeten Objekthalter liegt, wird dabei in sehr einfacher Weise durch den bei unserm Übermikroskop zur Scharfeinstellung dienenden Vertikaltrieb des Objekttisches[3]) getätigt, und zwar in einem Bewegungsbereich, der zur Scharfeinstellung nicht notwendig ist. Der Neigungswinkel kann durch Verstellung von Anschlagstiften in weiten Grenzen variiert werden. Zum Teil wurden recht plastische Bilder erzielt. Fig. 1 zeigt als Beispiel eine solche Aufnahme. Es handelt sich um eine eingerissene und zusammengeschobene Zaponfolie, auf der ein feines Metallpulver aus einer Wassersuspension aufgetrocknet ist. Bei stereoskopischer Betrachtung heben sich besonders deutlich die rechts auf dem Bilde erkennbaren zusammengeklumpten Metallteile ähnlich einem Brückenbogen von der Folie ab.

Fig. 1. Stereoskopische Aufnahme einer Zaponfolie mit aufgetrocknetem geklumptem Metallpulver (Vergr. 12000:1).

Berlin-Reinickendorf, Forschungs-Institut der AEG, den 19. März 1940. H. MAHL.

[1]) M. v. ARDENNE, Naturwiss. **28**, 113 (1940).
[2]) Anmerkung bei der Korrektur: Inzwischen erschienen in Z. f. Phys. **115**, 339 (1940) und Naturwiss. **28**, 248 (1940).
[3]) H. MAHL, Z. f. techn. Phys. **20**, 316 (1939).

Die Kautschukähnlichkeit der Cellulose und die Entstehung künstlicher Cellulosefäden als makromolekularer Vorgang.

Der Verfasser hat kürzlich an dieser Stelle eine Mitteilung unter der gleichen Überschrift veröffentlicht[1]). Kurz nachher wurde ihm erst durch einen Zufall die schon im Mai 1939 datierte Arbeit zweier russischer Forscher V. KARGIN und N. MICHAILOV[2]) bekannt, die auf anderem Wege zu ganz ähnlichen Ansichten gelangt sind, und zwar zu einem früheren Zeitpunkt. Es gebührt daher den Herren KARGIN und MICHAILOV die diesbezügliche Priorität.

Zwar hat der Verfasser die Kautschukähnlichkeit der partiellen Elastizität der Cellulose schon im Jahre 1937[3]) betont und theoretisch zu begründen versucht, aber der rein molekulare Charakter des Deformationsvorganges wurde von ihm erst später erkannt und zuerst am Ende des Jahres 1939 in einer Veröffentlichung[4]) erwähnt.

Breda-Ginneken (Holland), Laboratorium der N. V. Hollandsche Kunstzijde Industrie, den 19. März 1940.
P. H. HERMANS.

[1]) Naturwiss. **28**, 223 (1940).
[2]) Acta physicochim. URSS **11**, 343 (1939).
[3]) Kolloid-Z. **81**, 312 (1937).
[4]) Z. physik. Chem. A **185**, 300 (1939).

Die Stelle der Verzweigung der Stärkeketten.

Bei der Hydrolyse der vollständig methylierten Kartoffelstärke entstehen neben viel 2, 3, 6-Trimethylglucose einige Prozente Dimethylglucose sowie, etwas weniger als diese, 2, 3, 4, 6-Tetramethylglucose. Die Dimethylglucose ist ein Gemisch von mindestens 2 Strukturisomeren: von (wahrscheinlich) 2, 6-Dimethylglucose, die während der Hydrolyse und nachfolgenden Glucosidierung aus der Trimethylglucose entsteht, und von 2, 3-Dimethylglucose, die unmittelbar aus der Methylstärke stammt und durch kristallisierte Derivate gekennzeichnet wurde. Ihre Entstehung beweist, daß die Verzweigungsstelle in der Stärke das Hydroxyl 6 ist.

Heidelberg, Chemisches Institut der Universität, Institut für die Chemie des Holzes und der Polysaccharide, den 2. April 1940.
KARL FREUDENBERG. HANS BOPPEL.

Nitrosobenzolhämoglobin.

Untersuchungen über die Methämoglobinbildung durch Verwandte des Anilins ergaben, daß Nitrosobenzol mit Hämoglobin eine gut charakterisierte Molekularverbindung liefert: Nitrosobenzolhämoglobin. Die Verbindung entsteht auch aus Oxyhämoglobin unter Verjagung des Sauerstoffs, aus Kohlenoxydhämoglobin unter Vertreiben des Kohlenoxyds. Doch ist der letztgenannte Vorgang durch höheren Kohlenoxyddruck wieder rückgängig zu machen. Die neue Verbindung ist an sich gut beständig, besitzt eine violette Farbe ähnlich dem reduzierten Hämoglobin und eine breite Absorptionsbande wie dieses, doch mit zwei flachen Maxima

bei etwa 567 und 543 mμ. Einwirkung von Reduktionsmitteln — auch schon solcher Art und Konzentration, wie sie sich in frischen Blutkörperchen befinden — führt eine rasche Umwandlung in Methämoglobin herbei; offensichtlich bildet sich intermediär Phenylhydroxylamin, das dann wieder mit Luftsauerstoff in Nitrosobenzol übergeht. Auf diesem Hin und Her der Reaktion zwischen Phenylhydroxylamin und Nitrosobenzol bei Gegenwart von Sauerstoff und Blutfarbstoff einerseits, Ascorbinsäure oder ähnlicher Reduktionsmittel andrerseits dürfte es beruhen, daß Phenylhydroxylamin (daher auch Anilin) im Tierkörper während kurzer Zeiträume ein Vielfaches seiner Molzahl an Blutfarbstoff in Methämoglobin umzuwandeln vermag.

p-Nitrosotoluol und *m*-Nitronitrosobenzol verhalten sich gegenüber Hämoglobin wie Nitrosobenzol. Eigentümlicherweise kommt die Anlagerungsfähigkeit dem *p*-Nitrosodimethylanilin und *p*-Nitrosophenol nicht zu, was vielleicht mit deren chinoider Struktur zusammenhängt.

Berlin, Pharmakologisches Institut der Universität, den 8. April 1940. FRITZ JUNG.

Molekulare Schichten als Dielektrica hoher Durchschlagsfestigkeit.

Im Zusammenhang mit der Frage, Kondensatoren hoher Kapazität und Spannungsfestigkeit mit sehr geringen Mengen dielektrischer Substanz zu schaffen, wurde die Durchschlagsfestigkeit von Schichten einfach- und mehrfach-molekularer Dicke untersucht.

Unter anderem wurden mehrfach-molekulare Schichten von Salzen langkettiger Fettsäuren, sowie Eiweißkörper als *Blodgett*-Filme zwischen Metallelektroden gebracht.

Einfach molekulare Schichten schlugen bereits bei geringen Feldstärken durch. Dagegen betrug an Ba- und Cd-Stearatfilmen bei Schichtdicken zwischen 100 und 1000 ÅE. die maximale Feldstärke beim Durchschlag immer $4—5 \cdot 10^6$ V/cm. Innerhalb der angegebenen Grenzen ist dieser Wert unabhängig von der Schichtdicke. Im übrigen hängt die Durchschlagsfestigkeit von der Ionenkonzentration bei der Herstellung der Schicht, von der Kettenlänge, von der Konstitution des Moleküls und vom Feinbau der Schicht (dichte Filme oder Siebfilme) ab.

Die Vorgänge beim Durchschlag sprechen dafür, daß der Durchschlag als „Wärmedurchschlag" an Fehlstellen stattfindet. Eine Ausheilen oder Zuschmelzen von Fehlstellen erwies sich als möglich.

Berlin-Dahlem, Kaiser-Wilhelm-Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, den 9. April 1940.
P. A. THIESSEN. D. BEISCHER. H. Frhr. v. GILLHAUSSEN.

Elektrischer Widerstand von Einkristallen langkettiger Fettsäuren.

In Einkristallen langkettiger Fettsäuren oder ihren Salzen bilden die aneinander stoßenden polaren (Carboxyl- oder Carbox-Alkali-) Gruppen der einzelnen Molekülschichten Netzebenen mit Ionenbindung, die parallel zur Blättchenebene im ungefähren Abstand der doppelten Moleküllänge regelmäßig wiederholt angeordnet sind. Nach THIESSEN und STAUFF[1]) treten dabei in den stabilen Formen die Ionen dieser Netzebenen zu Quadrupolen zusammen.

Bei dieser Lage besteht die Möglichkeit, daß das elektrische Leitvermögen solcher Kristalle normal und parallel zur Blättchenebene verschieden ist. Versuche zeigten indes, daß der Kristall in beiden Richtungen praktisch nicht leitet. Auch Steigerung der Temperatur bis nahe an den Schmelzpunkt der Kristalle ändert den Widerstand parallel zur Blättchenebene nicht entscheidend.

Demgemäß ist offenbar die Quadrupolbindung in diesen Netzebenen so ausgeglichen, daß Ionen- oder Elektronenbewegungen durch äußere elektrische Felder nur sehr schwer erzwingbar sind.

Berlin-Dahlem, Kaiser-Wilhelm-Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie, den 9. April 1940.
P. A. THIESSEN. D. BEISCHER. H. Frhr. v. GILLHAUSSEN.

[1]) P. A. THIESSEN u. J. STAUFF, Z. physik. Chem. (A) 176, 397 (1936).

Besprechungen.

BECHERT, KARL, und CHRISTIAN GERTHSEN, **Atomphysik.** I. Allgemeine Grundlagen. II. Theorie des Atombaus. (Sammlung Göschen, Bd. 1009 und 1123.) Berlin: Walter de Gruyter & Co. 1938. Teil I: 149 S. und 52 Abbild. Teil II: 174 S. und 23 Abbild. 10 cm × 16 cm. Preis geb. je Bd. RM 1.62.

Wenn sich ein bewährter Theoretiker und ein gewiegter Experimentator vereinigen, um in freundschaftlicher Zusammenarbeit ein Werk über die neueste Phase der Atomphysik zu schreiben, so wird das allgemein begrüßt werden. Wenn dieses Werk, trotz seines alle modernen Fragen berührenden Inhalts, nur den Umfang von zwei bescheidenen Göschen-Bändchen erreicht, so wird das besonders von solchen Lesern gewürdigt werden, die etwa das vor kurzem erschienene, unbescheiden dicke Buch des Ref. zu studieren unternommen haben. Die Zusammenarbeit des Experimentators und des Theoretikers kommt in dem abgewogenen Verhältnis zum Ausdruck, in dem sich Theorie und Experiment in den beiden Bändchen präsentieren. Hierzu einige Beispiele aus Bd. I:

Eine einführende Skizze der kinetischen Gastheorie, in der zwar nicht alles bewiesen, aber alles Wesentliche verständlich gemacht wird, schließt mit der Erklärung des für die neuzeitlichen Experimente so wichtigen Begriffes des Wirkungsquerschnittes. Die Darstellung der elektrischen Elementarladung wird begleitet von einer Schilderung ihrer Messung im MILLIKANschen Condensator und der einschlägigen Korrektionen. Der Theorie der Kathodenstrahlen wird ein Bericht über die DES COUDRES-WIECHERT-KIRCHNERsche Geschwindigkeitsmessung der Elektronen und der TOLMANschen Messung ihrer Trägheit angeschlossen. Die Behandlung der statistischen Schwankungen der Teilchenzahlmessungen im Zählrohr wird durch Wiedergabe eines Registrierstreifens veranschaulicht. In dem Abschnitt über die Streuung der α- und β-Teilchen wird die RUTHERFORDsche Formel begründet und die Apparatur von GEIGER und MARSDEN abgebildet. Bei der Beschreibung der Stoßprozesse durch Energie- und Impulssatz wird bereits auf das Versagen der klassischen Mechanik bei gleichartigen Stoßpartnern hingewiesen. Den breitesten Raum in Bd. I nimmt mit Recht das Dualitätsproblem ein, die Dualität des Lichtes als Welle und Lichtquant und die der Materie als Corpuskel und Welle. Erstere erläutert am Photoeffekt (hierbei erstmalige Einführung von h!), der kurzwelligen Grenze des Röntgenspektrums, an Compton- und Raman-Effekt; letztere belegt durch die DE BROGLIEsche Wellenlängenformel, den Ramsauer-Effekt und vor allem durch die Beugungsbilder der Corpuskularstrahlen. Wegen der erkenntnistheoretischen Härte, welche in den zunächst sich widersprechenden Bildern von Welle und Korpuskel liegt, wird auf Bd. II verwiesen, wo die „Dualität" durch tiefere Analyse aufgelöst wird in eine „Complementarität" der beiden Auffassungen.

Bd. II erläutert zunächst in § 1 die Unschärferelation (Beugungserscheinungen bei Lichtwellen) und das Wasserstoffspektrum. Einen Beweis für die Unschärferelation bringt ein Anhang. § 2 behandelt die BOHRsche Theorie. Nebenbei bemerkt wird die allgemeine Quantenbedingung $\int p\,dq = n\,h$, die allerdings heute nur mehr historisches Interesse hat, wieder

einmal BOHR zugeschrieben, während sie erstmalig bei mir 1915 vorkommt und von BOHR erst 1918 in seine allgemeine Theorie der Linienspektren (Abhandlungen der dänischen Akademie) eingearbeitet wurde. Anwendung auf Schalenbau, charakteristisches Röntgenspektrum, Auger-Effekt usw. Im Rahmen des Korrespondenzprinzipes § 3, trefflich erläutert durch die Schemata von S. 55 und 56, wird eine besonders gründliche Darstellung des normalen Zeeman-Effektes und eine Einführung in die Matrixmechanik des Oscillators gegeben. Die adiabatische Invarianz der Quantenzahlen wird am Beispiel des Zeeman-Effektes klargemacht. § 4 bringt unter „Wellenmechanik I" die SCHRÖDINGERsche Theorie einschließlich der Austauschentartung beim He-Problem und der Störungstheorie, § 5 ergänzt sie durch Einführung des Elektronenspins, der sorgfältig korrespondenzmäßig begründet wird. Im Anschluß daran folgt die Systematik der Terme und des periodischen Systems, *Pauli*-Prinzip, Anomaler Zeeman-Effekt, *Stern-Gerlach*-Versuch. § 6 formuliert den Spin als Operator und führt bis dicht an die relativistische *Dirac*-Gleichung heran. Symmetrische und antisymmetrische Eigenfunktionen werden besprochen und am Beispiel der H_2-Molekel aufgezeigt. Paar-Erzeugung und Schauer-Bildung werden verständlich gemacht. Der Band schließt mit einer Skizze der Molekül-Spektren.

Wir fassen zusammen: Bd. I gibt dem Anfänger einen zwar lakonisch gestrafften, aber überall zuverlässigen Leitfaden in die Hand, der ihn bei gehörigem Studium und bei genügender Beherrschung der mathematischen Anfangsgründe in das weitverzweigte Gebiet der Atomphysik einführt; dem Kenner liefert er einen genußreichen Überblick über deren vielfältige Erfolge. Bd. II stellt naturgemäß höhere Anforderungen an die mathematische Vorbildung; aber auch hier ist der Zusammenhang mit der physikalischen Wirklichkeit überall gewahrt und die Darstellung so einfach gestaltet, als es die Breite und Tiefe des gebotenen Stoffes nur irgend zuläßt. A. SOMMERFELD, München.

Handbuch der Virusforschung. Hrsg. von R. DOERR und C. HALLAUER. 1. Hälfte: Die Entwicklung der Virusforschung und ihre Problematik. Morphologie der Virusarten. Die Züchtung der Virusarten außerhalb ihrer Wirte. Biochemistry and biophysics of viruses. Bearbeitet von F. M. BURNET, R. DOERR, W. J. ELFORD, G. M. FINDLAY, M. HAITINGER, C. HALLAUER, M. KAISER und W. M. STANLEY. — Zweite Hälfte: Die Virusarten als infektlöse Agenzien. Die Immunität gegen Virusinfektion. Die Technik der experimentellen Erforschung phytopathogener Virusarten. Bearbeitet von J. CRAIGIE, R. DOERR, G. M. FINDLAY, C. HALLAUER, K. M. SMITH, O. THOMSEN. Wien: Julius Springer 1938/39. 1. Hälfte: XII, 546 S. und 71 z. T. farbige Abbild. Preis brosch. RM 66.—, geb. RM 69.—. 2. Hälfte: XVI, 838 S. (S. 547—1384) und 19 Abbild. Preis brosch. RM 96.—, geb. RM 99.—. 17 cm × 25 cm.

Seitdem es gelungen ist, einige Virusarten in Gestalt von einheitlichen, hochmolekularen Proteinen darzustellen und zu charakterisieren, ist die Virusforschung als Grenzgebiet der Biologie und Chemie stark in den Mittelpunkt des Interesses gerückt worden. Aus diesem Grunde ist das Erscheinen des vorliegenden Handbuches ganz besonders zu begrüßen, zumal es sich durch seine Anlage weitgehend von anderen Virus-Handbüchern unterscheidet. Während diese zumeist zusammenfassende Darstellungen über die Viruskrankheiten und ihre Ätiologie bieten, stellt das vorliegende Werk die *Problematik* und *Methodik* der Virusforschung in den Mittelpunkt der Betrachtung in der richtigen Erkenntnis, daß sie die Sonderstellung der Virusforschung im Reich der biologischen Wissenschaften bestimmen. So ergibt es sich von selbst, daß die Beziehungen der Virusforschung zur Physik und zur Eiweißchemie, zur allgemeinen Physiologie und Pathologie der Zellen, zur Genetik und zum allgemeinen Lebensproblem starke Berücksichtigung finden. Der Eingangsabschnitt des Handbuches „Die Entwicklung der Virusforschung und ihre Problematik" von R. DOERR, den zu lesen kein für Mikrobiologie und allgemeine Naturwissenschaft Interessierter versäumen sollte, stellt nicht nur den gegenwärtigen Stand der Virusforschung unter kritischer Berücksichtigung umfangreicher Literatur von hoher Warte aus dar, er ist auch wegweisend für die weiteren Arbeiten an den entscheidenden Problemen dieses Gebietes und umfaßt zugleich das Programm des Handbuches. Zahlreiche ausgezeichnete Mitarbeiter sind für die Bearbeitung der einzelnen Kapitel gewonnen worden; wenn ihnen auch eine gewisse Unabhängigkeit und Selbständigkeit eingeräumt wurde, so ist doch durch das spürbare Wirken der Herausgeber in dem Werk ein Ganzes geschaffen worden, das als große Bereicherung unseres Schrifttums gelten kann und daher die gewiß nicht geringen Opfer der Autoren lohnen wird. W. J. ELFORD, M. HAITINGER und M. KAISER haben die Morphologie der Viruselemente bearbeitet; G. M. FINDLAY vermittelt unsere Kenntnisse auf dem Gebiet der Einschlußkörper und ihrer Beziehungen zu den Virusarten, und die Methoden der Züchtung der Virusarten außerhalb ihrer Wirte wurden von C. HALLAUER, F. M. BURNET, THE WALTER und ELIZA HALL zusammenfassend dargestellt. Höchstes Gegenwartsinteresse beanspruchen die ausgezeichneten Abschnitte „Biochemistry and Biophysics of viruses" von W. M. STANLEY, „Variation in viruses" von G. M. FINDLAY, „The principles of plant virus research" von K. M. SMITH und der durch hervorragende Kritik gekennzeichnete Artikel „Die Virusarten als tumorerzeugende Agenzien" von O. THOMSEN. JAMES CRAIGIE bearbeitete das Gebiet der Immunitätsforschung im Reich der Viruskrankheiten, während man die großen Abschnitte über den qualitativen und quantitativen Virusnachweis, die Übertragung der infektiösen Agenzien und ihre Ausbreitung im Wirtsorganismus sowie über die Tropismen und spezifischen Lokalisationen der Virusarten dem reichen Wissen und Erfahrungsschatz von R. DOERR verdankt. Tabellarische Zusammenstellungen der tierpathogenen und der bisher bekannten phytopathogenen Virusarten schließen das ausgezeichnete Werk, das erfreulicherweise „die Literaturangaben mit ungewohnter Raumverschwendung reproduziert", um unrichtiges Zitieren und Zitieren nach Zitaten zu verhindern. Unzweifelhaft liegt ein „Führer in einem schwer zugänglichen Gebiet von allgemeinster biologischer Bedeutung" vor, wie man ihn sich als Ergänzung anderer wertvoller Werke heute wünscht.

ADOLF BUTENANDT, Berlin-Dahlem.

Mitteilungen aus den Königl. Naturwissenschaftlichen Instituten in Sofia. Band XII. Hrsg. von IWAN BURESCH. Sofia: P. Gluschkoff 1939. 256 S. und zahlreiche Abbild. 20 cm × 28 cm.

Ein stattlicher Band (gr. 8°) von 256 Seiten, mit reicher Beigabe von Textabbildungen übertrifft vielfach weit an Inhalt und Ausstattung ähnliche Jahrbücher mitteleuropäischer Institute. Er erbringt den Beweis, daß Bulgarien mit seinen Instituten ganz auf

der Höhe wissenschaftlicher Leistungen der Gegenwart und deren Förderung steht.

Den Beginn des vielseitigen Inhaltes des Bandes macht eine Huldigungsschrift des Direktors der Königl. Naturwissenschaftlichen Institute in Bulgarien, Dr. IWAN BURESCH, für den gegenwärtigen König Boris III. Trotz des höfischen Charakters dieses reich mit Photos ausgestatteten, längeren Artikels (S. 1—42) in bulgarischer und französischer Sprache bringt dieser fast nur tatsächliche Anerkennungen ausländischer Fachmänner und läßt den König auch auf naturwissenschaftlichem Gebiete als würdigen Sohn und Nachfolger seines Vaters, König Ferdinands I. von Bulgarien, erscheinen, der als Kenner und Förderer der Naturwissenschaften weltbekannt ist.

König Boris ist vor allem ein eifriger Botaniker, der keine Mühe scheut, die Standorte seltener Gebirgspflanzen Bulgariens selbst aufzusuchen. Für Hebung und Verbesserung des Wildstandes trägt er persönlich Sorge. (Die Jagd ist in Bulgarien noch eine wichtige Quelle der Volksernährung.)

Als Ornithologe folgt der König den Fußtapfen seines Vaters. Im Zoologischen Garten in Sofia wurde eine Zentrale für Vogelschutz geschaffen, in der auch die Beringung von Zugvögeln erfolgt.

Zur Bekämpfung der zahlreichen Insektenschädlinge, die in Bulgarien gelegentlich auftreten, wurde auf Initiative des Königs eine entomologische Station für Bulgarien ins Leben gerufen.

Des weiteren enthält der Band:

PITTIONI, BRUNO, „Die Hummeln und Schmarotzerhummeln der Balkanhalbinsel", II. Spezieller Teil (S. 49—123, mit 6 schwarzen Tafeln [Kopulationsapparate]). Eine eingehende systematische Arbeit des bekannten Hymenopterologen, der erst vor Jahresfrist aus Wien kommend in den Verband des Kgl. Naturhistor. Museums in Sofia eintrat.

BURESCH, Dr. Iw., „Johann Kellerer und die botanischen Gärten S. M. des Königs der Bulgaren" (S. 123—180, mit 40 Photos, bulgarisch-deutsch). — Ein eingehender, pietätvoller Nachruf für den am 5. März 1938 im 79. Lebensjahre verstorbenen Direktor der Kgl. botanischen Gärten. KELLERER war der beste Kenner der bulgarischen Hochgebirgsflora, von der heute mehr als 3000 Arten in den verschiedenen Alpinarien der Kgl. botanischen Gärten stehen. Er war u. a. auch der Retter des allein in Philippopel aufgetretenen Astragalus physocalyx Fisch., der seither dort ausgerottet, nur mehr in 6 Exemplaren in den kgl. Gärten in Sofia und Vrana vorkommt.

STOJANOFF, N., u. ACHTAROFF, B., „Neues Material zur Kenntnis der Flora des Pirin-Gebirges (S. 181 bis 188). — STROUHAL, H., „Landasseln aus Balkanhöhlen, gesammelt von Prof. Dr. K. ABSOLON" (S. 193—205). — STOJANOFF, Prof. N., „Die in den letzten 11 Jahren erschienene Literatur über die Flora Bulgariens" (S. 209—230). — Diese bibliographisch sehr erwünschte Zusammenfassung bringt einige hundert Titel mit genauen Zitaten und eine Übersicht über die ältere botanische Literatur Bulgariens. — DRENSKY, P., „Die Spinnenfauna Bulgariens III" (S. 231—252 mit Verbreitungskarte). — Eine Fortsetzung der faunistisch sehr wertvollen Beiträge.

Kürzere Artikel sind noch von ALBERTI, Dr. B., „Eine neue Schmetterlingsart — Procris drenowskii, aus Bulgarien" (S. 43); BOETICHER, Dr. H. v., „Die Gartengrasmücke, Sylvia borin Bodd., in Bulgarien" (S. 48); JACENTKOVSKY, Ing. Dim., „Über einige Sarcophagiden aus Bulgarien" (S. 188); ACHTAROFF, B., und KELLERER, Joh. †, „Einige seltene Orchideen, die S. M. König Ferdinand I. auf der Insel Rhodos gesammelt hat" (S. 206); BURESCH, Dr. Iw., „Ausländische Literatur über die Fauna Bulgariens, Thraziens und Mazedoniens. VII." (S. 252—255). H. REBEL, Wien.

Astronomische Mitteilungen.

Neue Untersuchungen über die Energiequellen der Sterne und den Wasserstoffgehalt der weißen Zwerge.

Seit man aus geologischen Befunden und auf Grund astrophysikalischer Untersuchungen mit Sicherheit weiß, daß das Alter der Sterne mindestens einige 10^9 Jahre betragen muß, bildet die Frage nach den Quellen, aus denen die in Form von Strahlung abgegebene Energie im Sterninneren ständig neu ersetzt wird, ein Problem, dessen Lösung erst in den letzten Jahren mit einigem Erfolg in Angriff genommen werden konnte. Bekanntlich reichen alle aus der Makrophysik bekannten Energiequellen (Verbrennung, Kontraktion usw.) bei weitem nicht aus, um den Energiebedarf eines Sternes während seines ganzen Lebens zu decken. Unter den noch in Frage kommenden subatomaren Energiequellen scheidet die Materievernichtung ebenfalls aus, d. h. die Zerstrahlung von Protonen und Elektronen, da sie — abgesehen von der prinzipiell anfechtbaren Möglichkeit ihres Auftretens — zu ihrer Auslösung Energien bedarf, die Temperaturen entsprechen, die weit über den im Sterninneren herrschenden liegen. — Es bleibt als überhaupt mögliche und hinreichend ergiebige Energiequelle nur die Umwandlung der Elemente übrig, d. h. die durch diese verursachte Änderung und Befreiung der Kernenergien, die zwischen den Protonen und Neutronen vorhanden sind, aus denen die Kerne bestehen. Grundsätzlich sind hier Aufbauprozesse, bei denen, beispielsweise durch Beschießung mit Protonen, aus einem leichten ein schwererer Kern entsteht, und die entgegengesetzt verlaufenden Abbauprozesse möglich. Letztere können zwar unter großer Energieabgabe vor sich gehen, sind aber aus mancherlei Gründen, auf die hier nicht eingegangen werden kann, im Sterninneren von untergeordneter Bedeutung. Da ferner, wie wir wissen, in den Fixsternen Neutronen primär nicht vorkommen können, muß die Energieerzeugung durch den Aufbau der Elemente durch Protonen, also aus Wasserstoff über Helium erfolgen. Die Entwicklung eines Sternes verläuft also nach dieser Auffassung in Richtung abnehmenden Wasserstoffgehaltes. Auch die Aufbauprozesse erfordern hohe Energien, wenn sie mit hinreichend großer Wahrscheinlichkeit auftreten sollen. Bei den in den Fixsternen herrschenden Temperaturen ist die Wahrscheinlichkeit von Kernreaktionen pro Atomkern immer noch gering, jedoch wird dies hinreichend durch die in den zentralen Gebieten hohen Dichten ausgeglichen. (Daten für die Sonne [Spektrum G_0, normaler Zwergstern]: Zentraltemperatur $= 20 \cdot 10^6$ Grad; zentrale Dichte $= 80$ g/ccm; zentraler Druck $= 10^{11}$ Atm.) Erst in den letzten Jahren gelang es, aus der Mannigfaltigkeit der prinzipiell möglichen Aufbauprozesse diejenigen herauszufinden, die im Inneren der Sterne realisiert sein können. Dabei zeigte sich zunächst ganz allgemein, daß unter den im Sterninneren herrschenden Bedingungen solche Kernreaktionen, bei denen *beide* Kerne schwerer sind als Wasserstoff, nur mit verschwindend geringer Wahrscheinlichkeit auftreten können. Man fand also wiederum einen

Elementenaufbau aus Wasserstoff, d. h. durch Protoneneinfang. Ferner stellte es sich heraus, daß die Aufbauprozesse häufig nicht als Einzelvorgänge auftreten, sondern daß sie sich in Form sog. Umwandlungsketten vollziehen. Bei der Aufstellung der astrophysikalisch wichtigen Umwandlungsketten wurde durch VON WEIZSÄCKER ein wesentlich neuer Gesichtspunkt eingeführt, nach dem bestimmte Elemente beim Aufbau nicht umgewandelt werden, sondern nur als Autokatalysatoren auftreten und am Ende der Kette regeneriert sind[1]). Die von VON WEIZSÄCKER seinerzeit angegebene Umwandlungskette, bei der Helium als Autokatalysator auftritt, ist aber, wie sich inzwischen erwiesen hat, nicht verwirklicht, da die in ihr gebrauchten Kerne eine verschwindend kleine Zerfallsperiode besitzen und die Kette daher nicht ablaufen kann.

Mit der letzten Bemerkung haben wir bereits einen wichtigen Gesichtspunkt für die Auswahl der für die Energieproduktion der Sterne maßgebenden Umwandlungsketten angegeben: die Lebensdauer der Kerne. Die in der Umwandlung gebildeten neuen Kerne dürfen nicht instabil sein, und die Lebensdauer der Kerne in bezug auf Protoneneinfang darf im Vergleich zum Alter der Sterne weder zu groß noch zu klein sein. Außerdem muß natürlich die Geschwindigkeit der gesamten Umwandlung genügend groß sein, um die Energieentwicklung zu erklären, und schließlich kommen, was selbstverständlich ist, nur solche Kernreaktionen in Frage, die bei den im Sterninneren herrschenden Temperaturen und Dichten gerade die richtige Energieausbeute liefern. Nun hängt die Energieausbeute der Kernreaktionen sehr stark von der Temperatur ab, und man sieht, daß unter Berücksichtigung der obigen Forderungen von der Fülle der möglichen Aufbauprozesse wahrscheinlich nur wenige übrig bleiben, die im Sterninneren eine Rolle spielen können. Auf Grund einer derartigen sorgfältigen Sichtung der Kernreaktionen kam daher auch vor kurzem BETHE zu dem Ergebnis, daß für die Energieerzeugung im Inneren der normalen Sterne lediglich 2 Prozesse mit genügender Energieausbeute in Frage kommen[2]): 1. Der Aufbau von Deuteron aus 2 Protonen unter Emission eines Positrons $H^1 + H^1 \rightarrow H^2 + \varepsilon^+$. Aus dem Deuteron kann sich dann auf verschiedenen Wegen durch Protoneneinfang Helium bilden. 2. Die bei der Reaktion zwischen Protonen und Kohlenstoff ausgelöste Umwandlungskette, in der Kohlenstoff als Autokatalysator auftritt: $C^{12} + H^1 \rightarrow N^{13}$; $N^{13} \rightarrow C^{13} + \varepsilon^+$; $C^{13} + H^1 \rightarrow N^{14}$; $N^{14} + H^1 \rightarrow O^{15}$; $O^{15} \rightarrow N^{15} + \varepsilon^+$; $N^{15} + H^1 \rightarrow C^{12} + He^4$. In dieser Umwandlungskette wird also aus 4 Protonen ein Heliumkern gebildet. Beide Prozesse liefern bei einer Temperatur von $16 \cdot 10^6$ Grad dieselbe Energie; sie sind beide stark temperaturabhängig. Im Zentrum der Sonne, bei der oben angegebenen Temperatur und Dichte, spielt die H-H-Reaktion im Vergleich zu der C-N-Kette eine untergeordnete Rolle. Die Energiebefreiung aus der C-N-Kette beträgt dann etwa 3 erg/g · sek. (Beobachteter Energieverlust der Sonne: 2 erg/g · sek.) Bei Temperaturen unterhalb $16 \cdot 10^6$ Grad sinkt die Menge der aus der C-N-Kette befreiten Energie sehr rasch mit der Temperatur ab. In diesem Gebiet überwiegt die H-H-Reaktion, deren Energieerzeugung von wenigen Bruchteilen eines erg/g · sek aber ebenfalls bei weitem nicht genügt, um den Energiebedarf eines Sternes vollständig zu decken. Die Theorie ist daher auf Riesensterne, bei denen die Temperaturen im Zentrum unterhalb $^1/_4$ der der Sonne liegen, beispielsweise nicht anwendbar. Allgemein folgt, daß für Sterne, die in ihrem inneren Aufbau der Sonne ähnlich sind, die Energieproduktion durch die C-N-Kette zur Deckung des Energieverlustes ausreicht, während demgegenüber die aus dem Aufbau von Deuteron aus Protonen befreite Energie nur von geringer Bedeutung ist und durch sie der Energiebedarf jedenfalls nicht gedeckt werden kann. — Eine interessante Konsequenz aus der Theorie soll hier nur ganz kurz erwähnt werden: Auf Grund der bekannten Lebensdauern der Kerne in bezug auf Protoneneinfang läßt sich die Verteilung der Elemente in der Sonne größenordnungsmäßig angeben. Es ergibt sich nämlich in Übereinstimmung mit den astrophysikalischen Daten, daß die Häufigkeit der schweren Elemente mit abnehmender Atomnummer zunimmt, daß sie einen Höchstwert in der Sauerstoff-Kohlenstoff-Stickstoff-Gruppe erreicht und dann rasch abfällt, und daß die einzigen Ausnahmen durch Wasserstoff und Helium gebildet werden, die die häufigsten Elemente sind.

Die Theorie von BETHE erklärt lediglich die augenblickliche Energieerzeugung und die Verteilung der Elemente im Sonneninneren und ist keine Entwicklungstheorie. Daß mit ihrer Hilfe aber doch einige ungeklärte Fragen der Kosmogonie untersucht werden können, zeigte kürzlich EDDINGTON in einer interessanten Arbeit über den Wasserstoffgehalt der weißen Zwerge[1]). Wie schon erwähnt wurde, muß man annehmen, daß sich der Gehalt eines Sternes an Wasserstoff im Laufe seiner Entwicklung langsam erschöpft. Da nach den bisher vertretenen Auffassungen die weißen Zwerge das Endstadium der Sternentwicklung darstellen, müßten bei diesen Sternen die Energiequellen verbraucht und damit der Wasserstoffgehalt niedrig sein. Nun ist gerade bei den weißen Zwergen die Bestimmung des Wasserstoffgehaltes aus den Beobachtungen wesentlich leichter möglich als bei den normalen Sternen. Während bei diesen der Aufbau von vielen Parametern abhängt, die zum Teil nicht genau genug bekannt sind, liegen die Verhältnisse bei den weißen Zwergen viel günstiger. Der Aufbau dieser Sterne, die bekanntlich aus entartetem Gas bestehen, in dem Strahlungserscheinungen praktisch keine Rolle spielen können und dessen Zustand von der Temperatur unabhängig ist, wird in erster Linie nur durch 3 Parameter bestimmt, nämlich durch den Radius, die Masse und den Wasserstoffgehalt. Leider besitzen wir über die weißen Zwerge wegen ihrer geringen Leuchtkraft nur recht spärliche Beobachtungsdaten. EDDINGTON berechnet für 4 Objekte den Wasserstoffgehalt auf Grund der Massen und Radien und kommt bei drei weißen Zwergen zu dem Ergebnis, daß ihr Wasserstoffgehalt in der Tat sehr niedrig ist. Eine überraschende Ausnahme aber bildet der vierte weiße Zwerg, der Siriusbegleiter, dessen Wasserstoffgehalt über 40% beträgt. Diese Ausnahme ist um so ernster zu nehmen, als gerade für den Siriusbegleiter die Beobachtungsdaten am besten gesichert sind und daher das Ergebnis, wie EDDINGTON bei einer Untersuchung der möglichen Fehlerquellen feststellt, wenn auch vielleicht nicht quantitativ, so doch zumindest der Größenordnung nach richtig sein muß. Man hat demnach 2 Klassen von weißen Zwergen zu unterscheiden, von denen die eine durch die Objekte mit geringem Wasserstoffgehalt gebildet wird, deren kosmogonische Stellung auf Grund der bisherigen Theorien verstanden

[1]) C. v. WEIZSÄCKER, Physik. Z. **38**, 176 (1937).
[2]) H. A. BETHE, Phys. Rev. (2) **55**, 434—456 Nr 5 (1939).

[1]) EDDINGTON, M. N. **99**, Nr 8, 595—606 (1939).

werden kann. Die Einordnung der zweiten Gruppe, also der durch den Siriusbegleiter repräsentierten weißen Zwerge mit relativ hohem Wasserstoffgehalt, in das allgemeine Entwicklungsbild ist nun mit Hilfe der Betheschen Theorie möglich, wenn man sich die darin vertretene Auffassung zu eigen macht, daß der Aufbau von Helium aus Wasserstoff über das Deuteron vernachlässigt werden kann und daß als Hauptenergiequelle die Umwandlung von Wasserstoff in Helium unter Anwesenheit von Kohlenstoff und Stickstoff als Katalysatoren angesehen werden muß. Eddington führt aus, daß es dann zwei Erklärungsmöglichkeiten für das Vorhandensein der „anormalen" weißen Zwerge gibt. Da nach der Betheschen Theorie der Wasserstoffgehalt eines Sternes fast vollständig nur dann verbraucht werden kann, wenn die Katalysatoren C und N vorhanden sind, wäre es möglich, daß die weißen Zwerge im Laufe der Entwicklung vor dem Zwergstadium einen Punkt erreichen können, in dem durch einen noch unbekannten Prozeß der Aufbau schwerer Elemente aus C und N einsetzt, die letzteren also verbraucht werden. Da mit dem Verlust dieser beiden Elemente auch die subatomare Energieproduktion und die Umwandlung des Wasserstoffs fast aufhört, würde der Stern kontrahieren und sein Leben als weißer Zwerg mit hohem Wasserstoffgehalt beenden. Bei dieser Erklärung ist die Annahme des unbekannten Vernichtungsprozesses für C und N unbefriedigend, auch lassen sich noch andere Einwände erheben, die dazu führen, die zweite von Eddington vorgeschlagene Erklärungsmöglichkeit als die wahrscheinlichere anzuerkennen. Hier wird angenommen, daß sich die Katalysatoren und damit auch die schwereren Elemente erst nach der Kontraktion des Sternes gebildet haben. Ein Stern beginnt danach seine Entwicklung als Gaskugel aus reinem Wasserstoff, deren Energiebedarf infolge der Abwesenheit von Katalysatoren nur in verhältnismäßig geringem Maße aus subatomaren Quellen (Aufbau von Helium aus Wasserstoff über Deuteron) und in erster Linie aus der Kontraktion gedeckt wird. Er erreicht infolgedessen das Stadium eines weißen Zwerges mit hohem Wasserstoffgehalt und sehr großer Dichte (Siriusbegleiter!), in dem dann der Aufbau schwerer Elemente einsetzen kann, u. a. auch der von Stickstoff und Kohlenstoff, deren Katalysatorenwirkung zu der Befreiung subatomarer Energiequellen führt. In dem Maße, in dem C und N und die schweren Elemente gebildet werden, wächst auch die Energieproduktion, die schließlich den Strahlungsverlust übertrifft, so daß sich der Stern wieder ausdehnen muß. Mit der infolge der Expansion abnehmenden Dichte wird dann auch die Energieproduktion abnehmen, ebenso die Bildung schwerer Elemente. Der C-N-Gehalt des Sternes bleibt konstant und der Stern erreicht einen Gleichgewichtszustand. Er stellt jetzt einen normalen Stern dar, dessen Bildpunkt im Russell-Diagramm auf die Hauptserie fallen würde. Erst, wenn infolge des Verbrauches an Wasserstoff die Energieerzeugung nicht mehr ausreicht, beginnt der Stern zu kontrahieren und erreicht am Ende seiner Entwicklung zum zweitenmal das Stadium eines weißen Zwerges, und zwar jetzt eines solchen mit niedrigem Wasserstoffgehalt. — Danach gelangt ein Stern während seiner Entwicklung zweimal in das weiße Zwergstadium, einmal, bevor er die Hauptserie im Russell-Diagramm erreicht, und ein zweites Mal am Ende seines Lebens. Beide Stadien unterscheiden sich hinsichtlich des Wasserstoffgehaltes und der Leuchtkraft, die beide im ersten Stadium größer sind. Die Theorie hat noch eine Reihe wichtiger astronomischer Konsequenzen, auf die aber hier nicht eingegangen werden kann. Von den in ihr auftretenden Schwierigkeiten, die von Eddington selbst betont werden, sei nur erwähnt, daß z. B. nicht einzusehen ist, warum der Aufbau der schwereren Elemente und die Bildung von C und N gerade im ersten Zwergstadium einsetzt; ferner wäre auch der Einfluß der vollkommenen Vernachlässigung der H-H-Reaktion auf die Ergebnisse noch näher zu untersuchen. Wie man aber schon aus diesem gedrängten Überblick sehen kann, gibt die Theorie trotz dieser Schwierigkeiten doch ein geschlossenes Entwicklungsbild, das auch zum Verständnis des Auftretens der „anormalen" weißen Zwerge führt und in dem die neuesten Forschungen über die Energiequellen der Sterne verwertet sind, über die anfangs berichtet wurde.

Eine neue Theorie der Entstehung der extragalaktischen Nebel.

Es steht heute fest, daß die extragalaktischen Nebel zum großen Teil Sternsysteme darstellen, die zwar die Größe des Milchstraßensystems nicht erreichen, aber einen diesem wahrscheinlich ähnlichen Aufbau besitzen und, wie dieses, physisch und dynamisch abgeschlossene Gebilde sind. Sie stellen also eine verhältnismäßig einheitliche Gruppe von „Großformen" im Weltall dar, über deren Entstehung und Entwicklung eine geschlossene Theorie aufzustellen, wohl eine der interessantesten und wichtigsten wissenschaftlichen Aufgaben ist. Auf eine solche Theorie, die von G. Gamow und E. Teller kürzlich vorgelegt wurde, wollen wir hier zu sprechen kommen[1]). Folgende Beobachtungsdaten legen die Autoren ihren Überlegungen zugrunde: 1. Die Spiralnebel sind im Durchschnitt gleichförmig im Weltenraum verteilt. Ihre mittlere gegenseitige Entfernung beträgt $1{,}7 \cdot 10^6$ Lichtjahre. 2. Die Radien der Nebel schwanken zwischen 1000 und 4000—5000 Lichtjahren. Ihre mittlere Masse, wie sie aus der spektroskopisch beobachteten Rotation abgeleitet werden kann, beträgt 10^9 Sonnenmassen. 3. Die mittleren Leuchtkräfte betragen rund das 10^9fache der Sonne. (Aus dieser Zahl kann man übrigens unmittelbar schließen, daß die Spiralnebel keine zusammenhängenden Gasmassen sind, sondern aus einzelnen Sternen bestehen müssen. Denn, wenn die Nebel zusammenhängende Gasmassen wären, dann müßten sich ihre Leuchtkräfte zu der der Sonne annähernd wie die entsprechenden Oberflächen verhalten, was bei einem Nebelradius von 10^{10} Sonnenradien eine gegenüber der Sonne 10^{20}mal größere Helligkeit ergibt. Aus der Diskrepanz dieses Wertes zur Beobachtung folgt ohne weiteres, daß die Spiralnebel in Wirklichkeit aus einzelnen Sternen bestehen.) 4. Abgesehen von den nächsten Objekten, wie beispielsweise dem Andromedanebel, zeigen alle Spiralnebel in ihren Spektren eine systematische Rotverschiebung der Linien, die als Doppler-Effekt gedeutet eine der Entfernung proportionale Fluchtbewegung der Nebel offenbart: $V = \alpha R$, wobei $\alpha = 1{,}8 \cdot 10^{-17}$ sek^{-1}, nach den Beobachtungen von Hubble und Humason. In den weitaus meisten Fällen tritt gegenüber dieser Fluchtbewegung die Eigenbewegung der Spiralnebel zurück und kann vernachlässigt werden.

Wir wollen uns nun hier nicht mit den verschiedenen Deutungsmöglichkeiten der Rotverschiebung im Spektrum der extragalaktischen Nebel befassen, sondern die von Gamow und Teller in ihrer Theorie akzep-

[1]) G. Gamow u. E. Teller, On the origin of Great Nebulae. Physic. Rev. (2) 55, 654—657 (1939) Nr 7.

tierte Deutung ebenfalls als richtig hinnehmen, ohne uns mit den möglichen Einwänden zu beschäftigen. Danach handelt es sich bei der Rotverschiebung tatsächlich um einen reellen Doppler-Effekt, und die Welt der Spiralnebel dehnt sich im Laufe der Zeit aus. Mit der Annahme gleichmäßiger Expansion, d. h. zeitlich konstanter Expansionsgeschwindigkeit und dem obigen aus den Beobachtungen folgenden Wert für α ergibt sich dann, daß die Nebel sich vor $1{,}8 \cdot 10^9$ Jahren voneinander getrennt haben, daß also vor rund 2 Milliarden Jahren die Expansion eingesetzt hat (sog. kurze Zeitskala). GAMOW u. TELLER nehmen an, daß „im Anfang" das Universum erfüllt war von einem gleichmäßig verteilten Urgas. Über die Größe der Moleküle dieses Gases kann vorerst noch nichts ausgesagt werden, so daß die Gaspartikel zunächst ebensogut die Dimensionen von Fixsternen wie die von Atomen gehabt haben können. Eine Entscheidung darüber ist jedoch, wie wir weiter unten sehen werden, an Hand der Theorie möglich. In einem derartigen homogenen Gas bilden sich nun, wie JEANS gezeigt hat, Kondensationen, sobald geringe zufällige Inhomogenitäten in der Dichteverteilung auftreten. JEANS hat auch Bedingungsgleichungen für die Möglichkeit des Zerfallens infolge Gravitationsinstabilität — wie dieser Prozeß von ihm bezeichnet wurde — aufgestellt, deren eine wir der Einfachheit halber hier hinschreiben wollen:

$$\frac{G\varrho(4\pi R^3/3)}{R} \geqq \frac{V^2}{2}.$$

Hier bedeutet G die Gravitationskonstante, ϱ die Dichte des Gases, R den Radius, innerhalb dessen sich die Kondensationen bilden, und V die Geschwindigkeit der Gaspartikel. Auf diese Ungleichung beziehen sich auch GAMOW und TELLER in ihrer Theorie. Sie setzen voraus, daß, ebenso wie in der Welt der Spiralnebel in ihrem jetzigen Zustand, auch in dem Urgas die Geschwindigkeit der Partikel wesentlich durch die Fluchtgeschwindigkeit gegeben ist, so daß $V = \alpha R$ gesetzt werden kann. Man erhält dann, wovon man sich leicht selbst überzeugen kann, eine neue Bedingungsgleichung für das Auftreten von Kondensationen, die R nicht mehr enthält und die besagt, daß sich in einem expandierenden Gas nur dann Verdichtungen bilden können, wenn die Gasdichte größer oder gleich einem kritischen Grenzwert ist, der durch $\varrho_0 = 3\alpha^2/8\pi G$ gegeben ist. Setzt man die bekannten numerischen Werte ein, so ergibt sich für die kritische Grenzdichte $\varrho_0 = 0{,}6 \cdot 10^{-27}$ g/ccm. Die augenblickliche mittlere Dichte im Universum beträgt rund 10^{-30} g/ccm. Man sieht ohne weiteres, daß die Bildung von Kondensationen, d. h. von Spiralnebeln, jetzt nicht mehr stattfinden kann, sondern sich zu einer früheren Zeit vollzogen haben muß, bevor die mittlere Dichte den kritischen Wert unterschritten hatte.

Wie aus der Bedingungsgleichung folgt, hängt die Möglichkeit der Bildung von Verdichtungen von der Größe der Spiralnebel außer von der Dichte auch von der Geschwindigkeit der Partikel ab. Es kann gezeigt werden, daß die Entstehung der Nebel nicht lange vor Erreichen des kritischen Dichtewertes eingesetzt haben kann, denn im Frühstadium der Expansion waren einerseits die Dichten zu groß, andererseits die Geschwindigkeiten im Vergleich dazu zu klein, als daß ein Auseinanderfallen des Gases in Verdichtungen hätte stattfinden können, wenn man nicht annehmen will, daß die Partikel früher eine mit der Fluchtgeschwindigkeit vergleichbare Eigenbewegung besessen haben. Wenn man aber diese wenig begründete Annahme nicht machen will, so folgt, daß die Nebel sich erst dann aus dem Urgas haben bilden können, als die Dichte infolge der Expansion bis nahe an den kritischen Grenzwert ϱ_0 gesunken war.

Die auf das expandierende Universum angewandte JEANSsche Gleichung ermöglicht noch, wie GAMOW und TELLER zeigen, eine Reihe interessanter Schlußfolgerungen, auf deren Ableitung wir aber hier nicht eingehen wollen. So ergibt sich, daß die Bildung von Spiralnebeln zu einer Zeit eingesetzt haben muß, als alle Lineardimensionen 600mal kleiner als jetzt waren. Daraus folgt außerdem, in Übereinstimmung mit den Beobachtungen, daß die jetzigen gegenseitigen Entfernungen der Spiralnebel rund das 600fache der Nebeldurchmesser betragen, was in größenordnungsmäßiger Übereinstimmung mit den Beobachtungen steht. Ferner ergibt sich für die Geschwindigkeiten der Partikel des Urgases im Augenblick der Bildung von Kondensationen ein Wert von rund 100 km/sek, der von der Größenordnung der jetzigen Sterngeschwindigkeiten ist. Wenn es sich bei den Teilchen des Urgases um Moleküle handelte, so entspräche die obige Geschwindigkeit einer Temperatur von rund 1 Million Grad. Ganz abgesehen davon, daß eine derart hohe Temperatur an sich schon unwahrscheinlich ist, würde das zu der unmöglichen Folgerung führen, daß unter der Annahme derselben mittleren Dichte wie der jetzigen im Universum die Masse der Strahlung rund 10^9mal größer als die der Materie gewesen wäre! Es dürfte also wohl die naheliegende Annahme berechtigt sein, daß die Teilchen des Urgases Sterne waren und daß die Mehrzahl derselben bereits bei der Bildung der Nebel vorhanden war.

Die Schlußfolgerungen rein kosmologischer Art, die von den Autoren aus ihrer Theorie gezogen werden, wollen wir übergehen, da hier zu viele, zum Teil noch sehr umstrittene Voraussetzungen eingehen. Aber bereits aus dem rein kosmogonischen Teil der Überlegungen, über den hier berichtet wurde, kann man sehen, daß es jetzt schon möglich ist, eine in sich geschlossene Theorie der Entstehung der extragalaktischen Nebel zu entwickeln, die den Vorzug hat, mit einigen wenigen Grundannahmen auszukommen, deren rechnerisch-mathematische Durchführung außergewöhnlich einfach und übersichtlich ist und deren Aussagen in befriedigender Übereinstimmung mit dem Beobachtungsbefund stehen. Natürlich ist damit noch keineswegs die „Richtigkeit" der von den beiden Autoren aufgestellten Theorie erwiesen. Wenn überhaupt, so ist eine derartige Entscheidung eindeutig erst dann möglich, wenn es gelungen ist, eine widerspruchsfreie Deutung der Beobachtungsergebnisse — insbesondere der Rotverschiebung — zu geben, die die Grundlage der Theorie bilden. Bekanntlich ist das aber bis heute noch nicht gelungen.

VV Cephei — der größte bekannte Riesenstern.

Unter den zahlreichen veränderlichen Sternen gibt es eine Klasse — die der Bedeckungsveränderlichen —, bei der die Erforschung einzelner Vertreter zu sehr aufschlußreichen Ergebnissen bezüglich des physikalischen Aufbaues der Sterne und ihrer Atmosphären geführt hat. Es sei nur an die beiden Bedeckungsveränderlichen ε und ζ Aurigae erinnert [über den erstgenannten wurde bereits früher in dieser Zeitschrift berichtet; s. Naturwiss. **26**, 534 (1938)], bei denen die eine Komponente jeweils ein Übergigant von mehreren hundert Sonnendurchmessern Größe ist. Mit einem ähnlichen, jedoch anscheinend in mancher Hinsicht noch extremer liegenden Fall haben wir es bei dem Bedeckungsveränderlichen VV Cephei zu tun, über den

hier berichtet werden soll. Bei diesem Stern handelt es sich um ein Objekt, dessen Lichtwechsel bereits im Jahre 1912 von Miss CANNON entdeckt wurde[1]), ebenso wie die spektralen Eigentümlichkeiten und die Veränderungen im Spektrum, auf die wir noch zu sprechen kommen werden. Nicht erkannt wurde dagegen — was auch mit dem damals vorliegenden Beobachtungsmaterial kaum möglich war —, daß VV Cephei ein Bedeckungsveränderlicher ist. Nachdem vorher der Lichtwechsel des Sternes auf Grund mehrerer Hypothesen, u. a. auch der Doppelsternhypothese, untersucht wurde, entdeckte McLAUGHLIN vor rund 3 Jahren den Bedeckungstyp des Lichtwechsels von VV Cephei und konnte damit die bereits früher aufgestellte Doppelsternhypothese bestätigen und sicherstellen[2]). Auf Grund von mehr als 4000 Helligkeitsbeobachtungen und 27 aus den Spektren erhaltenen Radialgeschwindigkeitsbestimmungen leitete dann S. GAPOSCHKIN die Elemente des Lichtwechsels, die Bahn und die Dimensionen des Systems und der Komponenten von VV Cephei ab[3]). Er erhielt für den Lichtwechsel folgendes Ergebnis: Periode 20,4 Jahre (7430 Tage); Dauer der totalen Phase 470 Tage; Dauer der partiellen Phasen 20 Tage. — Mit den Ergebnissen GAPOSCHKINS bezüglich der Dimensionen der Bahn und der Komponenten setzte sich kürzlich V. A. GOEDICKE in einer umfangreichen Arbeit kritisch auseinander, in der er auch die Besonderheiten des Spektrums und dessen Veränderungen behandelt[4]). Auf diese Arbeit, die wohl die vollständigste bisher über diesen hochinteressanten veränderlichen Stern erschienene Untersuchung darstellt, beziehen sich im wesentlichen die folgenden Betrachtungen.

Für VV Cephei liegt ein verhältnismäßig umfangreiches Beobachtungsmaterial vor. Man sollte daher annehmen, daß alle aus den photometrischen und spektroskopischen Daten abgeleiteten Größen (Bahnelemente, Dimensionen, Masse und Dichte der Komponenten) sehr genau herauskommen. Daß dies nun in der Tat nicht der Fall ist, liegt zum größten Teil daran, daß die Helligkeit der Hauptkomponente unregelmäßigen Schwankungen unterworfen ist und daß die dieser Komponente angehörenden Linien in dem zusammengesetzten Spektrum Dopplerverschiebungen aufweisen, deren Größe auch zeitlich veränderlich ist. Beide Effekte überlagern sich natürlich den durch die Bedeckung erzeugten, periodisch ablaufenden Erscheinungen. Außerdem liegen die Verhältnisse allgemein bei einem derart extremen Fall wie VV Cephei sicher wesentlich komplizierter als beim Durchschnitt der Bedeckungsveränderlichen. GAPOSCHKIN wendet zur Ableitung der absoluten Dimensionen des Doppelsternsystems eine Methode an, bei der unter anderem auch die genaue Kenntnis folgender beider Größen erforderlich ist: 1. das monochromatische Intensitätsverhältnis der beiden Sterne, das durch die photographische Amplitude des Lichtwechsels (effekt. Wellenlänge 4400 Å) gegeben ist; 2. das Verhältnis der Flächenhelligkeiten der beiden Komponenten, das für die benutzte effektive Wellenlänge 4400 aus dem PLANCKschen Gesetz unter der Annahme von Temperaturen von 2500° bzw. 11000° bestimmt wurde. Er erhält dann für die Bahnneigung einen Wert von 72° und für den Radius der Hauptkomponente 2400 Sonnenradien.

Die neuerliche Bearbeitung des Materials unter weitgehender Heranziehung des spektroskopischen Beobachtungsbefundes durch GOEDICKE hat nun zu etwas anderen Ergebnissen geführt, was vor allem daran liegt, daß die obigen beiden von GAPOSCHKIN gemachten Annahmen doch recht zweifelhafter Natur sind. Da bei VV Cephei das Intensitätsverhältnis der beiden Sterne in der „effektiven" Wellenlänge 4400 höchstwahrscheinlich nicht einfach als durch das Verhältnis der photographischen Helligkeiten gegeben angesehen werden kann, bestimmt GOEDICKE die relativen Intensitäten in einer bestimmten Wellenlänge direkt aus den Spektren. Was die Temperatur der Sterne anbetrifft — deren Annahme einen wesentlichen Einfluß auf die Ergebnisse hat —, so ist diese außerordentlich unsicher bestimmbar. Aus dem Spektrum kann die Temperatur der kleineren Komponente — eines Sternes vom Spektraltyp B — nicht exakt abgeleitet werden, denn dieses wird nur immer zusammen mit dem des anderen Sternes beobachtet. Andererseits stellt der Übergigant — Spektraltyp M 2 — einen bisher einzig dastehenden Fall dar. Seine Temperatur kann daher auch nicht aus dem Vergleich mit anderen Sternen ermittelt werden. Infolgedessen geht GOEDICKE so vor, daß er die Temperaturen bestimmt, mit denen der M-Stern stabil bleibt. Durch diese Bedingung wird die Zahl der möglichen Temperaturwerte eingeschränkt. Sie erfährt eine weitere Einschränkung dadurch, daß die erhaltene Temperatur innerhalb der für die M-Sterne zulässigen Grenzen liegen muß. Die auf dieser Grundlage durchgeführten Rechnungen führen zu folgenden Ergebnissen: Neigung der Bahn gegen die Tangentialebene an die Himmelssphäre: 70°, Radius des B-Sternes 22 Sonnenradien, Temperatur des B-Sternes 12000°. Der Radius des Hauptsternes ergibt sich zu 3000 Sonnenradien, seine absolute Helligkeit zu −9,3 Größenklassen. Beide Werte sind nun sicherlich zu groß. Vor allem ist die absolute Leuchtkraft wesentlich höher als die aus der Masse-Leuchtkraftbeziehung folgende. Es ist daher wahrscheinlich, daß die Berechnung der Dimensionen aus der Lichtkurve unter den üblichen Voraussetzungen hier nicht angewendet werden darf. Wie GOEDICKE zeigt, ist der Ausweg aus dieser Schwierigkeit darin zu suchen, daß der M-Stern keine scharf begrenzte Oberfläche besitzt, sondern von einer diffusen Photosphäre und einer sehr ausgedehnten Chromosphäre umgeben ist. Die geläufige Interpretation der Lichtkurve, wonach der Lichtabfall vor der totalen Bedeckung ein Maß für den Durchmesser des Begleiters ist, ist in diesem Falle nicht mehr zulässig, da nunmehr der Helligkeitsabfall in erster Linie durch den Opazitätsgradienten der Atmosphäre des Hauptsternes bestimmt wird. Nimmt man für die Dicke der diffusen Photosphärenzone nur 3% des Radius des ganzen Sternes an, so zeigt sich in der Tat, daß die obengenannten Diskrepanzen wesentlich herabgesetzt werden. Für die Neigung der Bahn ergibt sich dann 90°. Die Bedeckung ist also zentral. Für Radius, Masse, Dichte und absolute Leuchtkraft des M-Sternes erhält GOEDICKE folgende Werte: $R_M = 1220$ Sonnenradien, $M_M = 47$ Sonnenmassen, $\varrho_M = 3 \cdot 10^{-8}\,\odot$; $L_M = -7{,}4$ Größenklassen. Die Neigung nimmt also zu, während die Bahndimensionen sowie Radius und Leuchtkraft des M-Sternes abnehmen; Radius und Dichte des B-Sternes bleiben hierbei unbestimmt. Für die Parallaxe ergibt sich ein Wert von 0″0009 = 1100 Parseks, der wesentlich besser mit der spektroskopischen Parallaxe übereinstimmt als bei der 70°-Bahn. Dasselbe gilt auch für die Übereinstimmung der hier abgeleiteten Leuchtkraft mit der aus der Masse-Leuchtkraftbeziehung

[1]) CANNON, H. A. **56**, 101 (1912).
[2]) MCLAUGHLIN, H. A. C. **1936**, 397.
[3]) S. GAPOSCHKIN, Harvard Circular **1937**, 421.
[4]) V. A. GOEDICKE, Observatory **62**, 197 (1939).

folgenden. Es ist daher anzunehmen, daß die unter der Annahme einer diffusen Photosphäre des Hauptsternes berechneten Daten ein recht gutes Bild von den wirklichen Dimensionen im System VV Cephei geben. Wir haben es demnach bei diesem Veränderlichen mit einem in mancher Hinsicht einzigartigen Doppelsternsystem zu tun. Die Periode des Lichtwechsels wird in ihrer Länge nur durch ε Aurigae übertroffen. Während die lichtschwächere Komponente ein B-Stern ist, bildet die helle Komponente einen Übergiganten, vom Spektraltyp M 2, dessen Halbmesser bis über die Jupiterbahn reicht und der der größte bis jetzt entdeckte Fixstern ist.

Nicht weniger aufschlußreich als die bisher wiedergegebenen Forschungsergebnisse sind der spektroskopische Beobachtungsbefund und die sich aus ihm ergebenden Schlußfolgerungen, auf die wir nunmehr noch kurz zu sprechen kommen wollen. VV Cephei zeigt ein „composite"-Spektrum, das sich zum Teil aus dem eines B-Sternes und dem eines M 2-Riesen zusammensetzt. Dazu kommen die Balmerlinien des Wasserstoffs und eine Reihe erlaubter und verbotener Linien des ionisierten Eisens, alle in Emission. Dieses komplizierte Spektrum ist im Verlaufe des Lichtwechsels mannigfachen Veränderungen unterworfen. Während der Bedeckung des B-Sternes durch den M-Stern verschwindet das Spektrum des ersteren, ebenso die Balmer-Emission. Wenn nach der Bedeckung das B-Spektrum wieder erscheint, treten auch die Balmer-Emissionslinien wieder auf, jedoch nicht gleichzeitig, sondern zeitlich nacheinander in der Reihenfolge H β, H γ ... usw., also in einer Folge abnehmender Wellenlänge. Im Gegensatz dazu bleiben die Emissionslinien des Fe^+ während der Bedeckung im wesentlichen unverändert, ebenso der Betrag ihrer Doppler-Verschiebung. Nach Beendigung der Bedeckung ist zusammen mit dem wieder auftauchenden B-Spektrum eine starke Zunahme der Intensität der Absorptionslinien im Gesamtspektrum zu beobachten, die dann langsam wieder auf ihre normalen Intensitäten absinken. — Das Spektrum des M-Sternes zeigt — wie anfangs schon erwähnt — sowohl hinsichtlich der Linienintensitäten als auch des Betrages der Linienverschiebung unregelmäßige Schwankungen, die auf eine unregelmäßige Helligkeitsänderung und radiale Pulsation des Sternes zurückgeführt werden müssen. Wie man sieht, heben sich aus der Mannigfaltigkeit der Erscheinungen im Spektrum zwei Gruppen heraus: die eine Gruppe enthält alle während der Bedeckung veränderlichen Größen, die andere alle diejenigen, die von der Bedeckung unabhängig sind. GOEDICKE kommt in seiner Untersuchung zu folgender plausiblen Deutung der hier in großen Zügen wiedergegebenen Beobachtungsergebnisse.

Die Balmeremission ist offenbar an den B-Stern gebunden, da sie ja mit diesem auftaucht und verschwindet. Der B-Stern ist also umgeben von einer ausgedehnten Wasserstoffatmosphäre, die er zum Leuchten anregt und die — wie aus dem verschiedenzeitigen Auftauchen der Balmerlinien nach der Bedeckung geschlossen werden muß — sich aus Zonen verschieden hohen Anregungszustandes zusammensetzt, deren Ausdehnung direkt aus den Beobachtungen abgeleitet werden kann. Es ergibt sich für die Ausdehnung dieser Wasserstoffzonen in Einheiten des Radius des B-Sternes (22 Sonnenradien): H $\beta = 5{,}3$, H $\gamma = 2{,}6$, H $\delta = 1{,}1$. Außerdem treten in Verbindung mit dem B-Stern Balmer-Linien in Absorption auf, deren Ursprung jedoch noch nicht genau festgelegt werden konnte. Möglicherweise entstehen sie in einer den Stern in großer Entfernung umgebenden Wasserstoffhülle, die außerhalb des Gebietes der Wasserstoffemission liegt und sich auf den Stern zu bewegt. Es ist aber auch möglich, daß dieser sich kontrahierende Wasserstoffnebel (auf die Kontraktion muß aus der Linienstruktur geschlossen werden) das ganze System einhüllt. Eine Klärung dieser Frage muß späteren Beobachtungen vorbehalten bleiben. — Die Deutung der vom Lichtwechsel unabhängig auftretenden, von normalen und metastabilen Niveaus aus emittierten Linien des Fe^+ ist ohne Schwierigkeiten möglich. Wegen der Unabhängigkeit vom Lichtwechsel können die Linien nur in einem Fe^+-Gas angeregt werden, das das ganze Doppelsternsystem durchsetzt. Gestützt wird diese Auffassung noch wesentlich dadurch, daß verbotene Linien auftreten, denn diese verbotenen Übergänge können bekanntlich nur dann stattfinden, wenn die Dichte sowohl der anregenden Strahlung als auch der Materie hinreichend niedrig ist, so daß die Atome während der Verweilzeit auf den metastabilen Niveaus ungestört bleiben. Das ist aber nur in großer Entfernung von der Quelle der anregenden Strahlung der Fall. Auf einige Besonderheiten des Fe^+-Spektrums, wie die von GOEDICKE beobachteten unregelmäßigen Intensitätsänderungen der normalen Linien, kann im einzelnen hier nicht eingegangen werden.

Was nun die Deutung des Spektrums des M-Sternes anbetrifft, so kann diese hier auch nur im Überblick wiedergegeben werden: Kurze Zeit vor und nach der Bedeckung scheint der B-Stern durch die Atmosphäre des M-Sternes. Es treten dann die Linien der in der M-Stern-Atmosphäre vorhandenen Elemente in Absorption auf, und zwar, je nach Verteilung der Elemente, in einer von der Phase des Lichtwechsels abhängigen Stärke. Für folgende neutralen Elemente konnte die Verteilung innerhalb der Atmosphäre gut bestimmt werden: Eisen, Titan, Vanadium, Kobalt und Mangan. Dabei erwies es sich, daß die größte Höhe über der Photosphäre von Ti erreicht wird. Von den ionisierten Elementen erstreckt sich Ca^+ in die weitaus größere Höhe als die neutralen Elemente von größenordnungsmäßig etwa einem Sternradius. Im übrigen treten bei der Interpretation der Linien H und K des Ca^+ einige Schwierigkeiten auf, die wir hier übergehen müssen, die aber noch weitere Beobachtungen erfordern, um das eben wiedergegebene Resultat auch quantitativ zu sichern. — Am weitesten aber dehnt sich Ti^+ über der Photosphäre aus, und zwar so weit, daß der B-Stern sich sicher zumindest auf dem größten Teil seiner Bahn, möglicherweise sogar längs der ganzen Bahn, in der Ti^+-Atmosphäre des M-Sternes bewegt.

Hiermit wollen wir unsere Betrachtungen über dieses außergewöhnliche Doppelsternsystem abschließen. Wenn auch manche Frage erst auf Grund weiterer Beobachtungen wird beantwortet werden können, so lassen sich doch, wie wir gesehen haben, schon jetzt die charakteristischen Merkmale des Systems, die Bahndimensionen, die Überriesennatur der M-Komponente und die Deutung der mannigfachen spektralen Eigentümlichkeiten qualitativ angeben, woraus hervorgeht, daß VV Cephei zu den interessantesten und für die astronomische Forschung wichtigsten Repräsentanten seiner Gruppe von Himmelsobjekten gehört.

H. LAMBRECHT.

Herausgeber und verantwortlicher Redakteur: FRITZ SÜFFERT, Berlin W 9.
Verlag von Julius Springer in Berlin W 9. — Druck der Spamer A.-G. in Leipzig.